



**T.C.**

**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**A206.0 ALÜMİNYUM BAKIR ALAŞIMLARININ FARKLI  
AŞILAYICILAR İLE TANE BOYUTUNUN İNCELTİLMESİ VE T6 ISIL  
İŞLEMİ UYGULAYARAK MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Selman ÇETİNTÜRK**

**DOKTORA TEZİ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ocak-2021**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Selman ÇETİNTÜRK tarafından hazırlanan “ A206.0 ALÜMİNYUM BAKIR ALAŞIMLARININ FARKLI AŞILAYICILAR İLE TANE BOYUTUNUN İNCELTİLMESİ VE T6 ISIL İŞLEMİ UYGULAYARAK MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ ” adlı tez çalışması 13/01/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Doç. Dr. Volkan KALEM

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

.....

#### Üye

Prof. Dr. Mustafa ACARER

.....

#### Üye

Prof. Dr. Ahmet AVCI

.....

#### Üye

Dr. Öğr.Üyesi Mehmet YILDIRIM

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 16201039 nolu proje ile desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Selman ÇETİNTÜRK

Tarih: 29.01.2021



## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

# A206.0 ALÜMİNYUM BAKIR ALAŞIMLARININ FARKLI AŞILAYICILAR İLE TANE BOYUTUNUN İNCELTİLMESİ VE T6 ISIL İŞLEMİ UYGULAYARAK MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Selman ÇETİNTÜRK

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU  
2021, 222 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Prof. Dr. Mustafa ACARER

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Doç. Dr. Volkan KALEM

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet YILDIRIM

Saf halde yumuşak bir metal olan alüminyum farklı alaşım elementleriyle alaşımlandığında endüstride çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yüksek mekanik özelliklerin öne çıktığı malzeme tasarımında alüminyum bakır alaşımları daha ziyade tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımları düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, yüksek korozyon direnci, kolay şekillendirilebilme ve mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesi gibi özelliklere sahip olmasından dolayı birçok farklı sektörde kullanım alanı bulmuştur. Özellikle otomotiv, taşımacılık, uzay ve havacılık, elektronik, makine ve üretim gibi pek çok sektörde alüminyum alaşımlarının kullanımı giderek artış göstermektedir. Bu çalışmanın amacı Al-%5Cu alüminyum döküm alaşımına AlSr10, Al-3Ti-1B, Al-5Ti-1B gibi üç farklı tane inceltici mastır alaşımlar girilerek döküm yapıldıktan sonra elde edilen test numunelerine T6 ısıl işlemi uygulayarak alüminyum bakır alaşımının mekanik özelliklerinin geliştirilmesidir. Al-%5Cu alaşımına tane incelticiler girildikten sonra kokil kalıba döküm yapılmıştır. T6 ısıl işlemi için 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de su verme ve takibinde 175°C'de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi altı farklı sürelerde yapay yaşlandırma uygulanmıştır. T6 ısıl işlemi uygulanan numunelere Brinell Sertlik ölçümleri, Charpy çentik darbe testleri ve çekme deneyleri yapılmıştır. Numunelerin mikro yapıları optik mikroskopla incelenmiş ve alaşımların mikro yapılarındaki tane boyutu ölçümleri imaj analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Tarayıcı elektron mikroskopuyla (SEM) çekme çubuk numunelerin kırık yüzeylerinden nokta, alan ve mapping analizleri yapılarak alaşımların içyapıları incelenmiştir. Ayrıca bu Al-%5Cu alaşımlarına 3000 m kayma mesafesinde aşınma deneyi uygulanmıştır. Bu alaşımların korozyon dayanımını belirlemek amacıyla 590 saat daldırılmalı korozyon deneyleri yapılmıştır. XRD analizleri alaşımların kristalografik karakterizasyonlarını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen en yüksek çekme dayanımı; Al-5Ti-1B alaşımı girilen ve 175°C'de 18 saat yaşlandırılan numunede 417 MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek Brinell sertlik değeri ise Al-5Ti-1B tane inceltici girilen ve 175°C sıcaklıkta 18 saat süreyle yaşlandırılan numunede 112 HB olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar üç eksenli Matlab grafik çizimleriyle de desteklenmiştir. AlSr10 tane incelticilerin, titanyum ve bor kadar etkili olmadığı görülmüştür. Malzemenin tane boyutunu inceltme etkisi yönünden, Al-5Ti-1B ve Al-3Ti-1B tane incelticileri karşılaştırıldığında Al-5Ti-1B'un, Al-3Ti-1B'dan daha etkili olduğu görülmüştür. Daha önce Al-Si alaşımları üzerinde bu türden çalışmalar yapılmış olmakla, Al-%5Cu alaşımları üzerinde yeterli bir çalışmaya rastlanmadığı için bu konu üzerinde yoğunlaşmıştır. Endüstride Al-%5Cu döküm alaşımları üretilmekle beraber uygulamada pek çok değişken parametre mevcut olduğundan optimum parametre değerleri üzerinde odaklanılmıştır. Bu çalışmada tane inceltme işleminde %0,6 oranında girilen Al-5Ti-1B tane inceltici mastır alaşımı en etkili tane inceltici olarak bulunmuştur. Al-%5Cu alaşımına Al-5Ti-1B tane inceltici mastır alaşımı ilave edildiğinde 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma ile ortalama tane boyutu 38 µm olarak elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** A206 Al-%5Cu Alaşımı, Mekanik özellikler, Mikro yapı, T6 Isıl işlemi, Tane inceltme, Yaşlandırma

## ABSTRACT

### PhD THESIS

# THE GRAIN REFINING OF A206.0 ALUMINUM COPPER ALLOYS WITH DIFFERENT INOCULANTS AND IMPROVING THE MECHANICAL PROPERTIES BY APPLYING T6 HEAT TREATMENT

Selman ÇETİNTÜRK

Konya Technical University Institute of Graduate Studies  
Department of Metallurgical and Materials Engineering

Advisor: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2021, 222 Pages

#### Jury

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Prof. Dr. Mustafa ACARER

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM

Asst. Prof. Dr. Mehmet YIDIRIM

Aluminum, which is a soft metal in pure form, has a wide range of applications in the industry when it is alloyed with different alloying elements. Aluminum copper alloys are preferred in material design where high mechanical properties stand out. Aluminum alloys have been found to be used in many different sectors due to their properties such as low density, high specific strength, high corrosion resistance, easy forming and improving their mechanical properties. The use of aluminum alloys is increasing in many sectors, especially in automotive, transportation, aerospace, electronics, machinery and manufacturing. The aim of this study is to improve the mechanical properties of aluminum copper alloy by applying T6 heat treatment to the test specimens obtained by casting three different thinner master alloys such as AlSr10, Al-3Ti-1B, Al-5Ti-1B to Al-5% Cu cast aluminum alloy. Al - 5% Cu alloy after entering the grain thinners were cast into the gravity mold. For T6 heat treatment, 4 hours solution at 535°C, quenching at 25°C followed by artificial aging of 3, 6, 9, 12, 15 and 18 hours at 175°C were applied. Brinell hardness measurements, Charpy notch impact tests and tensile tests were performed on T6 heat treated samples. The microstructures of the samples were examined by optical microscope and grain size measurements of the microstructures of the alloys were determined by image analysis method. The internal structures of the alloys were examined by scanning electron microscopy (SEM) from the broken surfaces of the drawn rod samples by point, area and mapping analysis. In addition, wear tests were applied to these Al-5 %Cu alloys at 3000 m sliding distance. In order to determine the corrosion resistance of these alloys, 590 hours of immersion corrosion tests were conducted. XRD analyzes were performed to determine the crystallographic characterization of the alloys. The highest tensile strength obtained; Al-5Ti-1B alloy aged at 175°C for 18 hours was obtained as 417 MPa. The highest Brinell hardness value was obtained as 112 HB in the sample which entered Al-5Ti-1B grain refiner and aged at 175°C for 18 hours. The results obtained in this study are also supported by the three-axis Matlab graphic drawings. AlSr10 grain refiners have not been as effective as titanium and boron. Al-5Ti-1B grain refiners were found to be more effective than Al-3Ti-1B in terms of grain size thinning effect of the material. Al-Si alloys have been made on this kind of work before, Al-%5Cu alloys have been focused on this issue since there is not enough work on the alloys. Al-%5Cu casting alloys are produced in the industry, but in practice there are many variable parameters and focus on optimum parameter values. In this study, Al-5Ti-1B grain refining master alloy, which is entered at a rate of 0.6% in grain refining, was found to be the most effective grain refiner. When Al-5Ti-1B grain refining master alloy was added to Al-5 %Cu alloy, the average grain size was obtained as 38 µm after 18 hours aging at 175°C.

**Keywords:** A206 Al-%5Cu Alloy, Aging, Grain refinement, Mechanical properties, Micro structure, T6 Heat treatment.

## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamın her aşamasında desteğini esirgemeyen ve deneyimleri ile bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU'na ve tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mustafa ACARER ve Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya teşekkür ederim. Bu çalışmamda katkılarından dolayı Prof. Dr. Mehmet Çunkaş'a ve Doç. Dr. Volkan Kalem'e teşekkür ederim.

Bu çalışmada bana yardım eden Arş. Gör. Cihad NAZİK, Arş. Gör. Harun SEPET, Araş. Gör. Bilal Çetinkal, Arş. Gör. Emin SALUR ve Arş. Gör. Halit SÜBÜTAY'a hassaten teşekkür ederim. Araştırma projesi ile bu çalışmaya destek veren Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Doktora tezimi bu süreçte her türlü sıkıntıya beraber göğüs gerdiğimiz sevgili eşime ve çocuklarıma ithaf ediyorum.

Selman ÇETİNTÜRK  
KONYA-2021

# İÇİNDEKİLER

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ALÜMİNYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>3</b>
2.1. Saf Alüminyum.....	5
2.2. Elektrik ve Isı İletimi.....	7
2.3. Alüminyumun Doğada Bulunuşu.....	7
2.4. Alüminyumun Tarihçesi.....	10
2.5. Alüminyumun Elde Edilişi.....	11
<b>3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI</b> .....	<b>15</b>
3.1. Alüminyum Alaşımalarının Sınıflandırılması.....	15
3.2. Alüminyum Bakır Alaşımaları.....	20
3.3. Alüminyum Alaşımalarının Kullanım Alanları.....	22
3.3.1. Uzay ve Havacılık Endüstrisi.....	23
3.3.2. Otomotiv Endüstrisi.....	23
3.3.3. Gemi Endüstrisi.....	24
3.4. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi.....	24
<b>4. TANE İNCELTİCİ MASTIR ALAŞIMLAR</b> .....	<b>30</b>
4.1. Tane İnceltici Miktarları.....	31
4.2. Tane İnceltme Prosesi.....	33
4.3. Alüminyum Alaşımalarında Tane İnceltme Yöntemleri.....	33
4.3.1. Mikro Yapılar.....	35
4.4. Tane İnceltme Prensipleri.....	35
4.4.1. Tane İnceltme Eğrileri.....	37
4.4.2. Tane İnceltme İşleminin Soğuma Eğrisine Etkisi.....	38
4.5. Tane Boyutu Ölçüm Teknikleri.....	40
4.5.1. Alan Ölçümsel (Planimetrik) Yöntem.....	40
4.5.2. Kesişim Yöntemi.....	41
4.5.3. Hall-Petch Bağıntısı.....	41
4.6. Çekirdeklenme.....	42
4.6.1. Homojen Çekirdeklenme.....	42
4.6.2. Heterojen Çekirdeklenme.....	44
4.6.3. Çekirdeklenme Teorileri.....	45
4.6.3.1. Karbür / Borür Teorisi.....	46
4.6.3.2. Faz Diyagramı / Peritektik Teorisi.....	47
4.6.3.3. Peritektik Hulk Teorisi.....	49
4.6.3.4. Hiper Çekirdeklenme Teorisi.....	51

4.6.3.5. Çift Çekirdeklenme Teorisi .....	52
4.6.3.6. Çözünen Teorisi .....	52
<b>5. T6 ISIL İŞLEMİ .....</b>	<b>54</b>
5.1. Al-%5Cu Faz Denge Diyagramları.....	54
5.2. Alüminyum Alaşımları İçin Isıl İşlem Göstergeleri .....	54
5.3. T6 Yaşlandırma Isıl İşlemi .....	58
5.3.1. Solüsyona Alma İşlemi .....	59
5.3.2. Solüsyona Alma ve Su Verme Sırasında Dikkat Edilecek Noktalar .....	60
<b>6. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>62</b>
<b>7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>70</b>
7.1. Üretim .....	71
7.1.1. Döküm İşleminin Yapılması .....	71
7.1.2. Çekme Çubuk Numunelerinin Kalıbı .....	73
7.1.3. Ergimiş Metalde Gaz Giderme İşlemi .....	73
7.1.4. Tane İnceltici Mastr Alaşımların Girilmesi .....	74
7.1.5. T6 Isıl İşleminin Yapılması .....	75
7.1.6. Mikro Yapı İnceleme Numunelerinin Hazırlanması .....	77
7.2. KARAKTERİZASYON .....	79
7.2.1. Mikro Yapı İncelemeleri.....	79
7.2.2. Tane Boyutu Analizleri.....	80
7.2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu SEM ve EDS İncelemeleri .....	80
7.2.4. XRD İncelemeleri .....	81
7.3 MEKANİK ÖZELLİKLER .....	82
7.3.1 Brinell Sertlik Ölçümleri .....	82
7.3.2 Çekme Deneyleri .....	83
7.3.3 Çekme Çubuk Numunelerinin Standart Ölçüleri.....	87
7.3.4 V-Charpy Çentik Darbe Testleri.....	88
7.3.5 Aşınma Deneyi .....	90
7.4 DALDIRMALI KOROZYON DENEYİ.....	92
7.4.1 Daldırılmalı Korozyon SEM İncelemeleri.....	94
7.4.2 Daldırılmalı Korozyon Yüzeyaltı (Subsurface) İncelemeleri .....	95
<b>8. DENEY SONUÇLARI .....</b>	<b>96</b>
8.1. A206.0 Alaşımının Kimyasal Bileşimi.....	96
8.2. Mikro Yapı Sonuçları .....	96
8.3. Tane Boyutu Analiz Sonuçları.....	98
8.4. SEM ve EDS Analiz Sonuçları .....	107
8.4.1. Tane İnceltici Girilmeyen Al-Cu Alaşımlarının SEM Analiz Sonuçları ....	107
8.4.2 AlSr10 Girilen Al-%5Cu Alaşımlarının SEM Analiz Sonuçları .....	109
8.4.3. Al-3Ti-1B Girilen Al-%5Cu Alaşımlarının SEM Analiz Sonuçları.....	112
8.4.4. Al-5Ti-1B Girilen Al-%5Cu Alaşımlarının SEM Analiz Sonuçları.....	116
8.5. XRD Analizlerinin Sonuçları.....	120
8.5.1. Tane İnceltici Girilmeyen Al-Cu Alaşımının XRD İnceleme Sonuçları....	124
8.5.2. AlSr10 Girilen Al-%5Cu Alaşımının XRD İnceleme Sonuçları .....	128
8.5.3. Al3Ti1B Girilen Al-%5Cu Alaşımının XRD İnceleme Sonuçları .....	132



8.5.4. Al <sub>5</sub> Ti <sub>1</sub> B Girilen Al-%5Cu Alaşımının XRD İnceleme Sonuçları .....	136
<b>8.6. MEKANİK ÖZELLİKLER .....</b>	<b>141</b>
8.6.1. Brinell Sertlik Analiz Sonuçları.....	141
8.6.2. ekme Deneylerinin Sonuları.....	142
8.6.3. Akma Deneylerinin Sonuları .....	146
8.6.4. % Uzama değerlerinin karşılaştırılması.....	149
8.6.5 V-Charpy entik darbe testlerinin sonuları .....	150
8.6.6. Aşınma Deneylerinin Sonuları.....	152
8.6.6.1 Al-Cu alaşımının aşınma deneyi SEM analiz sonuları .....	153
8.6.6.2 AlSr <sub>10</sub> aşılayıcı girilen Al-Cu alaşımının aşınma SEM analiz sonuları.	156
8.6.6.3 Al <sub>3</sub> Ti <sub>1</sub> B girilen Al-Cu alaşımının aşınma SEM analizi sonuları .....	159
8.6.6.4 Al <sub>5</sub> Ti <sub>1</sub> B girilen Al-Cu alaşımının aşınma SEM analiz sonuları .....	161
<b>8.7 Daldırmalı Korozyon Deneylerinin Sonuları .....</b>	<b>163</b>
8.7.1 Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuları .....	166
8.7.1.1 Aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımının Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuçları .....	167
8.7.1.2 AlSr <sub>10</sub> ile Aşılanan Al-Cu Alaşımının Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuçları .....	169
8.7.1.3 Al <sub>3</sub> Ti <sub>1</sub> B ile Aşılanan Al-Cu Alaşımının Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuçları .....	171
8.7.1.4 Al <sub>5</sub> Ti <sub>1</sub> B ile Aşılanan Al-Cu Alaşımının Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuçları .....	172
8.7.2 Daldırmalı Korozyon Yüzeyaltı (Subsurface) İnceleme Sonuçları .....	174
<b>8.8. MATLAB Grafik izimleri .....</b>	<b>177</b>
8.8.1. [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] İlişkisi.....	177
8.8.1.1. Al-Cu Alaşımı için [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği izimleri .....	177
8.8.1.2 AlSr <sub>10</sub> ile aşılanan Al-Cu alaşımı için [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği izimleri .....	178
8.8.1.3. Al <sub>3</sub> Ti <sub>1</sub> B ile aşılanan Al-Cu alaşımı için [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği izimleri.....	179
8.8.1.4. Al <sub>5</sub> Ti <sub>1</sub> B ile aşılanan Al-Cu alaşımı için [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği izimleri.....	180
8.8.2. [Aşınma – Tane boyutu - Akma dayanımı] İlişkisi için Matlab grafiği .....	181
8.8.3. [Daldırmalı korozyon - Tane boyutu - Akma dayanımı] İlişkisi için Matlab grafik izimi.....	182
8.8.4. Sertlik - Tane boyutu - Yaşlandırma süresi ilişkisi için Matlab grafiği çizimi .....	183
<b>9. TARTIşMA.....</b>	<b>186</b>
9.1. Mikro Yapı ve Tane Boyutu Analizlerinin Değerlendirilmesi .....	186
9.1.1. Çekirdeklenme ve Tane Büyümesine Aşılayıcıların Etkileri .....	190
9.1.2 Çekirdeklenme ve büyüme aşamasında alt tabakaların rolü.....	192
9.1.3 Tane İnceltme Mekanizmaları .....	192
9.2. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	194
9.3. Akma Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	195
9.4. Yüzde Uzama Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	196
9.5. Brinell Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	197
9.6 V-Charpy entik Darbe Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	198

9.7. SEM ve EDS Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	199
9.8. XRD Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	202
9.9. Aşınma DeneY Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	207
9.10 Daldırılmalı Korozyon DeneY Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	208
9.10.1 Korozyon SEM İnceleme Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	209
9.10.2 Korozyon Yüzeyaltı (Subsurface) inceleme sonuçlarının değerlendirilmesi .....	211
<b>10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>212</b>
10.1 Sonuçlar .....	212
10.2. Öneriler .....	215
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>216</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>222</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

AA	Amerikan Alüminyum Birliği
$\alpha$	Genleşme Katsayısı
°C	Santigrat derece
°K	Kelvin derece
Ağ.(%)	Yüzde ağırlık
A <sub>KD</sub>	Katı-duvar ara yüzey alanı
A <sub>KS</sub>	Katı-sıvı ara yüzey alanı
ASTM	Amerikan Malzeme Test ve Standartları
d	Tane Boyutu
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi
EDX	Enerji Dağılım
EHT	Yüksek Enerji Kaynağı
GGG50	Sfero Döküm
HB	Brinell Sertlik
HR <sub>C</sub>	Rockwell Sertlik
HV	Vickers Sertlik
kg	kilogram
kN	Kilo Newton
Lf	Katılaşma Gizli Isısı
LM28	Alüminyum Alaşımı
MAG	Büyütme
mm	Milimetre
$\mu$ m	Mikro metre
MPa	Mega Paskal
N	Newton
nm	Nano metre
pA	Piko amper
ppm	Milyonda bir parçacık
psi	Basınç birimi
r*	Kritik çekirdek yarıçapı
s	Saniye

SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TALSAD	Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği
$T_f$	Katılaşma Denge Sıcaklığı
$T_m$	Ergime sıcaklığı
V-Charpy	Çentik darbe
$v$	Katılaşma Hızı
$V_s$	Katının Özgül Hacmi
$\gamma_{DK}$	Duvar-katı ara yüzey serbest enerjisi
$\gamma_{KS}$	Katı-sıvı ara yüzey serbest enerjisi
$V_L$	Sıvının Özgül Hacmi
$\gamma_{DS}$	Duvar-sıvı ara yüzey serbest enerjisi
WD	Genişlik
XRD	X ışını difraksiyonu
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
$\Delta G$	Serbest Enerji Değişimi
$\Delta G_V$	Hacim Serbest Enerji Değişimi
$\Delta T$	Sıcaklık Farkı
$\rho$	Yoğunluk ( $g/cm^3$ )
$\sigma_{\phi}$	Çekme Mukavemeti (MPa)
$\sigma_a$	Akma Mukavemeti (MPa)

## 1. GİRİŞ

Bu çalışmada alüminyum bakır alaşımının çekme dayanımı, akma dayanımı, yüzde uzama ve sertlik gibi mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve artırılması üzerinde çalışılacaktır. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve artırılması iki aşamalı olarak yapılacaktır. Birincisi alüminyum bakır alaşımının mikro yapı tane boyutunu inceltmek amacıyla aşılama işlemlerinin girilmesidir. Bu aşılama işlemleri de üç farklı tip olarak belirlenmiştir. İkinci olarak aşılama işlemleri girilerek dökümü yapılan alaşımlara T6 yapay yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanacaktır. Böylece hem tane incelticilerin hem de ısıl işlemin alaşım malzemesi üzerindeki etkileri incelenecektir. Tane inceltici olarak AlSr10, Al-%5Ti-%1B ve Al-%3Ti-%1B master alaşımlar seçilmiştir. Mukavemet/ağırlık oranlarının yüksek olması nedeni ile alüminyum alaşımları otomotiv ve havacılık endüstrisinde olduğu kadar makine endüstrisinde ve perçin imali gibi çeşitli otomotiv yan sanayi dallarında kullanılmaları gün geçtikçe daha da artmaktadır. (Meriç, 1989; Kenneth ve Michael,1999; Zeytin ve ark., 2001).

Özellikle bakır esaslı alüminyum alaşımları, kolay şekil verilebilme yanında yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılmaları yaygındır. Bu alaşımların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik işlemler arasında çökeltme sertleştirme/yaşlanma önemli bir yer tutar. (Sanders, 1983; Sanders ve Stalley, 1983; Demirci, 1988). Düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemetleri ile dikkat çeken alüminyum alaşımları, birçok metalik malzemenin yerini alarak, kullanım alanlarını sürekli genişletmektedir. (Zeytin, Arısoy ve Teymur, 2001).

Çökeltmeye karşı duyarlı olan alaşımlar, aşırı doymuş katı çözeltileri oluşturan alaşımlardır. Aşırı doymuş katı fazdan zaman ve sıcaklık etkisi ile yeni bir fazın çökmesi sonucunda malzemenin sertlik ve mukavemeti artar. Katı bir fazdan solvüs çizgisinin geçilmesi sırasında başka bir katı fazın ayrışması kolayca engellenebilir. Böylece kristal kafesi gerilerek malzemenin dayanımı artar. Bu olay özellikle bazı demir dışı alaşımlar için büyük önem taşıyan çökeltme sertleşmesinin temelini oluşturur. (Kenneth, 1999).

Çökeltme sertleşmesi, ikinci fazın küçük tanecikler halinde ana faz içinde çökmesinin sağlandığı alaşım sistemlerinde mukavemet arttırmada kullanılan en önemli yöntemlerden birisidir. Çözme tavından sonra uygulanan hızlı soğutma (su verme) işlemi de mekanik özelliklere etki eden bir aşamadır. Soğutma hızı; birim zamanda sıcaklık düşüş miktarı  $0^{\circ}\text{C} / \text{birim zamandır}$ . (Topbaş, 1993).

Soğuma söz konusu atom türlerinin ısı aktive yer değiştirmelerine fırsat vermeyecek kadar hızlı olmalıdır. Bu kritik soğuma hızı  $V_{kr}$  öncelikle malzemenin kimyasal bileşimine ve bir ölçüde de tane büyüklüğüne bağlıdır. Soğuma sırasında kristal yapının dönüşmesi gerekir. Yani malzeme en az iki allotrop modifikasyonda bulunmalıdır. Eğer yüksek sıcaklıktaki kafes yapısı düşük sıcaklıktaki kararlı modifikasyondan daha fazla alaşım elementi çözebilirse, yeni kararsız fazın sertlik ve dayanımı çok artar. (Karabulut ve Aran, 1984; Cavazos ve Cola's, 2001).

Bu çalışmada Al-%5Cu alaşımına üç farklı tane boyutu inceltici aşılama girilerek alaşımın mikro yapıları incelenmiştir. Tane inceltici olarak AlSr10, Al-%3Ti-%1B ve Al-%5Ti-%1B mastır alaşımlar seçilmiş ve ağırlıkça %0.20, %0.40, 0.60 ve %0.80 oranlarında girilmiştir. Bu tane incelticilerin yapısında bulunan Sr, Ti ve bor elementlerinin tane boyutu inceltmedeki etkileri incelenecektir. Al-3Ti-1B ve Al-5Ti-1B mastır alaşımların Ti:B oranından, bor elementinin oranı sabit tutularak, titanyum oranındaki artışın etkinliği araştırılacaktır.

Alüminyum alaşımlarının döküm ve dövme olarak iki temel kategoriye ayrıldığı ve bunların tablosu 3. bölümde verilmiştir. Alüminyum bakır alaşımları ve bunların otomotiv endüstrisi, uzay ve havacılık ve endüstrisi gibi kullanım alanları üzerinde durulmuştur. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkileri bu bölümde açıklanmıştır.

Tane inceltici master alaşımların çeşitleri, tane inceltme prensipleri, tane boyutu ölçüm teknikleri 4. bölümde açıklanmıştır. Katılama sırasında çekirdeklenmenin homojen ve heterojen olduğu izah edilmiştir.

Çözeltiye alma, su verme ve yapay yaşlandırma safhalarını içeren T6 ısı işleminin açıklandığı 5. bölümde ısı işlem göstergeleri açıklanmıştır. Isıl işlem çevrim periyodunun gösterildiği bu bölümde çökelme sertleşmesi izah edilmiştir.

Kaynak araştırması bölümü olan 6. bölümde literatürde yapılan çalışmalar incelenerek bu çalışmaya ışık tutacak ve yön verecek olan veriler ele alınmıştır.

Bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin sıralandığı 7. bölümde; kullanılan cihazların markaları, buldukları yerler ile uygulanan yöntemler açıklanmıştır.

Son bölümde ise yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tane boyutu, sertlik özellikleri, çekme dayanımları, çentik darbe dayanımları ve taramalı elektron mikroskop incelemelerinin sonuçları gösterilmiştir.

## 2. ALÜMİNYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ

Alüminyumun simgesi Al'dur. Atom numarası 13'tür. Oksidasyona karşı üstün direnci olan alüminyum doğada genellikle boksit cevheri şeklinde bulunur. Alüminyum endüstrinin pek çok dalında binlerce farklı ürünün yapı bileşeni olarak kullanılmakta olup dünya ekonomisi içerisinde çok önemli bir yeri tutmaktadır. Alüminyumdan üretilmiş yapısal bileşenler havacılık ve uzay endüstrisi için vazgeçilmezdir. Alüminyum özellikle yüksek dayanım ve hafiflik özellikleri gerektiren hem taşımacılık ve hem de inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. (Wikipedia, 2019).

Alüminyum, yumuşak görece hafif bir metal olup aynı zamanda mat gümüşümsü renktedir. Alüminyumun bu rengi, havaya maruz kaldığında yüzeyinde teşekkül eden çok ince oksit tabakasından ileri gelmektedir. Alüminyum, kıvılcım çıkarmaz ve zehirleyici değildir. Saf alüminyumun çekme gerilmesi yaklaşık 49 MPa iken, alaşım halinde bu değer 700 MPa'a kadar çıkar. Alüminyumun yoğunluğu, bakırın veya çeliğin yaklaşık üçte biri kadardır. Alüminyum kolaylıkla dövülebilir, dökülebilir ve makinede işlenebilir. Çok üstün korozyon direncine sahip olması, yüzeyinde teşekkül eden oksit tabakasının kendisini koruyucu özellikte olmasındandır. (Anonim, 2020).

Alüminyum manyetik değildir ve normal şartlarda suda çözünmez. Yer kabuğunda oksijen ve silisyumdan sonra en bol bulunan bir elementtir. Hem dünya ve hem ay yüzeyinde bol miktarda mevcuttur. Dünyanın katı yüzeyinin ağırlığının yaklaşık %8'ini oluşturan alüminyum bolluk bakımından üçüncü metal olarak gelir. Alüminyum doğada genellikle serbest metal olarak bulunmamaktadır bunun yerine yüzlerce farklı mineral ve birleşiklerine rastlanmaktadır.

Alüminyum metalinin mukavemet/ağırlık oranı çok yüksektir ve bu alüminyumun en önemli özelliğidir. Alüminyumun en büyük avantajı hafif olmakla birlikte aşınmaya karşı dayanıklılığı olmasıdır. Aşınmaya karşı dayanıklı olması yüzeyinin hava ile temasında oluşan çok ince alüminyum oksit tabakasının daha fazla oksitlenmeye engel olmasındandır. Alüminyumun alaşımları içinde en sağlamı bakır alaşımlı olanlarıdır. (Arslan, 2020). Hans Oersted, 1825 yılında metalik alüminyumu; alüminyum klorür ile potasyum cıva karışımıyla ısıtmak ve sonra da cıvayı buharlaştırarak, metalik parlak bir toz şeklinde elde etmiştir:



Buna karşılık alüminyum diğer elementlerin az miktarları ile yapmış olduğu alaşımları sert ve dayanıklıdır. Alüminyum alaşımları dövülebilir, işlenebilir, kaynak yapılabilir, üzerine boya ve cila yapılabilir. Alüminyumun yüzeyinde meydana gelen koruyucu oksit tabakası  $2,5 \cdot 10^{-5}$  milimetre kadar olsa da çok kuvvetli koruyucudur. Bu alüminyum oksit tabakası, ergitilmiş metal yüzeyinde daha da kalınlaşarak onu da korur. Metalin daha ileri seviyedeki oksidasyonuna mani olur. Bundan dolayı ince alüminyum yaprağını hidrojen alevinde dahi yakmak mümkün değildir.

Alüminyum oksijen hamlacıyla bile bu koruyucu oksit tabakası yüzünden kesilemez. Alüminyumun ısı ve elektrik iletme kabiliyeti iyidir. Kimyasal maddelerin birçoğuna ve bazı asitlere dayanıklı olmasına rağmen alkalilere ve hidroklorik aside karşı çok aktiftir. Yüzeyindeki alüminyum oksit film tabakası bu alkali ortamda çözünmektedir. Alüminyumun oksijenle birleşmesi sırasında yüksek oranda ısı açığa çıkar. İnce toz alüminyum yeterli miktarda oksijen ile karıştırılması halinde patlayıcı olur. (Çatal ve Erbil, 2010). Alüminyumun hem alüminium hem de aluminium şeklinde yazılmaktadır. "International Union of Pure and Applied Chemistry" (IUPAC) organizasyonu 1990 yılında alüminium kullanımını, dünya standardı olarak onaylamıştır.

Alüminyum 19. yüzyılın sonlarında keşfedilmiştir. Fakat bugün çeliğin yanı sıra bütün mühendislik uygulamaları için çok önemli metal olarak kullanılmaktadır. Alüminyum doğada metalik değil sadece bileşik olarak bulunur. Alüminyum metalinin üretimi için temel madde boksit bileşiğidir ve %50'nin üzerinde  $Al_2O_3$  bileşiği içerir. Saf alüminyum düşük dayanıklı bir malzemedir. Yüksek dayanıklılık görel olarak yüksek gerilme dayanımı ve esneklik limitleriyle birlikte uygun alaşım elemanları eklenerek elde edilebilir. Bu alüminyum alaşım malzemeleri "ısıtılabilir" ve "doğal olarak sert" malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır.

Alüminyum, yeryüzünde silisyum ve oksijenden sonra en çok bulunan 3. element olmasına rağmen, endüstriyel olarak üretimi 1886 yıllarında elektroliz yönteminin kullanılmasıyla başlamıştır. Alüminyum, çok kullanılan diğer metaller olan demir, kalay ve kurşun gibi, tabiatta bileşikler halinde bulunur.

Alüminyumun endüstriyel olarak üretimi ise, ABD'de Charles Martin Hall ile Fransa'da Paul T. Heroult'un 1886 yılında birbirlerinden habersiz yaptıkları elektroliz yöntemiyle başlamıştır. Bu sebeple iki bilim adamının ismi verilen Hall-Heroult işlemi, günümüzde alüminyum cevherinden alüminyum eldesinde bütün dünyada kullanılmakta olan temel yöntemdir.



Bu yöntem, günümüzde halen kullanıldığından, 1886 yılı alüminyum endüstrisi için başlangıç yılı olarak kabul edilebilir. Werner von Siemens'in 1886 yılında dinamoyu keşfi ve K. J. Bayer'in 1892 yılında boksitten alümina elde eden Bayer prosesini bulması ile endüstriyel çapta alüminyum üretimi çok kolaylaşmıştır. Böylece bu genç metal olan alüminyum, demir çelikten sonra en çok kullanılmakta olan ikinci metal olmuştur.

## 2.1. Saf Alüminyum

Saf alüminyumun özellikleri alüminyuma eklenen elementlerin etkisi ile değiştirilebilir. Böylece alüminyumun metal olarak özellikleri onun ekonomik ve ideal bir malzeme olmasını sağlar. Alüminyum hafif olmasıyla, onunla aynı hacimdeki çelik malzemenin ağırlığının yaklaşık üçte biri kadar ağırlıktadır. Alüminyumun ışığı yansıtma kabiliyeti yüksektir. Gümüş beyazı renginin bu özelliğe olan katkısıyla gerek iç gerekse dış mimarîde cazibeli bir görünüme sahiptir. Alüminyum yüzeyindeki bu güzel görünüm, eloksal yani anodik oksidasyon ile uzun müddet korunabilir. Bazı alüminyum alaşımlarının mukavemeti, yapı çeliğinin mukavemetine denk belki daha yüksektir.

Alüminyum elastik bir malzeme olduğu için ani darbelere karşı dayanıklıdır ve bu dayanıklılık düşük sıcaklıklarda da azalmaz. Çeliklerin ise düşük sıcaklıklarda ani darbe mukavemeti azalır. Alüminyum, işlenmesi çok kolay bir metaldir. Hatta alüminyumun kalınlığı 1/100 mm'den daha ince folyo veya tel haline getirilebilmektedir. Alüminyum elektrik ve ısıyı bakır kadar iyi iletir. Alüminyum metaline şekil vermek için dövme, dökme, haddeleme, presleme, çekme ve ekstrüzyon gibi tüm yöntemler uygulanabilir. Alüminyum 40-540 N/mm<sup>2</sup> aralığında ortalama mukavemeti ile pek çok kullanım alanı için optimum çözüm imkanları sunmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 2.1'de alüminyum elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri görülmektedir. (Kocabıçak, 1996).

**Çizelge 2.1** Alüminyum elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Sembölü	: Al
Görünüş	: Gümüşi beyaz metal
Atom numarası	: 13
Atom ağırlığı	: 26.98 g/mol
Grup, periyot, blok	: 13, 3, p
Renk	: Gümüş
Enerji seviyesi başına elektronlar	: 2, 8, 3
Yoğunluk (20°C de)	: 2,6989 g/cm <sup>3</sup>
Ergime sıcaklığı	: 660,32°C, 933.47°K, 1220.58°F
Kaynama sıcaklığı	: 2519°C
Ergime ısısı	: 10,71 kJ/mol
Buharlaşma ısısı	: 294 kJ/mol
Isı kapasitesi	: 24,2 j/mol·K
Kristal yapısı	: YMK Yüzey Merkezli Kübik
Kafes sabiti	: 4.050 Å
Atom Hacmi	: 10.0 cc / mol
Yükseltgenme seviyesi	: +3
Elektronegatifliği	: 1,61 Pauling ölçeği
İyonlaşma enerjisi	: 577,5 kJ/mol
Atomik yarıçapı	: 1.43 Å
Kovalent yarıçapı	: 118 pm
Elektrik direnci (20°C'de)	: 26,50 nΩ·m
Elektrik iletkenliği (saf Al 2°C'de)	: % 64,94 IACS
Isıl iletkenlik	: 237 W/(m·K)
Isıl genleşme (25°C'de)	: 23,1 µm/(m·K)
Mohs sertliği	: 2,75
Brinell sertliği	: 245 MPa (HRC: 167 MPa)
Elastik modülü (E)	: 7.2 . 10 <sup>3</sup> kp/mm <sup>2</sup>
Kayma modülü (G)	: 2.7 . 10 <sup>3</sup> kp/mm <sup>2</sup>

## 2.2. Elektrik ve Isı İletimi

Alüminyumun elektrik iletkenliği yüksektir ve saf alüminyum için bu değer 34 m/Ohm mm<sup>2</sup>'dir. Elektrik iletkenleri için saf alüminyum ile AlMgSi malzemeleri kullanılmaktadır. Alüminyum metalinin ısı iletkenliği, 80-230 W/m°K olarak demire oranla yaklaşık dört kat daha yüksektir.

Alüminyum manyetik değildir. Bu özellik elektrik ve elektronik mühendisliği ile makine mühendisliği alanlarında oldukça önemlidir. Alüminyum metalinin geri dönüşüm imkânı mevcuttur. Sanayide kullanıldığı haliyle "geri dönüşüm" ifadesi özellikle kırıntı (scrap) ve kullanılmış ürünlerin, yeni ürünlerin imalinde ikincil hammadde kullanımını anlamına gelir. Kullanımdaki alüminyum hammaddelerin yaklaşık üçte biri, uygun geri dönüşüm ile hiçbir kalite kaybına uğramaksızın, üretilmiştir.

Alüminyum geri dönüşüm metalini işlemek için gerekli olan enerji, birincil alüminyum üretimine gereken enerjinin sadece %5'i kadardır. Birçok malzeme arasında seçim yapılması gerekirse alüminyum en ekonomik ve doğayla en barışık malzemedir. Alüminyumun metalinin hurdalardan geri kazanımı, alüminyum endüstrisi için önemli bir ekonomik değerdir. Geri kazanım işlemi, 1900'lü yıllarından beri uygulanmakta olup metalin tekrar eritilmesi esasına dayanır. Bu yöntem metalin cevherinden birincil üretimine göre çok daha ekonomiktir.

## 2.3. Alüminyumun Doğada Bulunuşu

Alüminyum yer kabuğunda %7,5-8,1 oranında bulunmasına rağmen serbest olarak çok nadir bulunur. Alüminyumun ticari üretiminin tarihi yaklaşık yüz yıldan biraz fazladır. Alüminyumun ilk keşfedildiği senelerde cevherinden ayrıştırılması çok zor bir metal idi. Yine alüminyumun rafinesi en zor metallere biridir. Bunun sebebi, çok hızlı oksitlenmesidir. Alüminyumun yüzeyinde teşekkül eden bu oksit tabakası çok kararlı olduğu için demirdeki pasın aksine yüzeyden sıyrılmaz.

Alüminyum, alüminyum silikat formunda feldisplatlarda, kor kayalarda, mikalarda, killi topraklarda, demirce zengin lateritlerde ve boksitte bulunur. En önemli alüminyum cevheri sayılan boksitteki alüminyum oksit tenörü %52 nispetinde bulunur. Boksit kayaları fiziksel görünüm yönünden bileşime bağlı olarak çok farklılıklar gösterir. Sarımsı beyazdan gri rengine veya pembe renginden koyu kırmızıya kadar değişen renklerde bulunmaktadır. Hemen hemen bütün kıtalarda boksit minerali

bulunmuştur. Çin, ABD, Hindistan, Avustralya, Malezya, Endonezya, Gana, Rusya, Yugoslavya, Yunanistan, İtalya, Macaristan ve Fransa'da büyük oranda boksit mineralleri mevcuttur. Metalik alüminyumun elde edilmesi için boksit cevherlerinin %45 oranında veya daha fazla alüminyum oksit tenörüne sahip olması gerekir. Günümüzde %40-60 alümina içeren böhmit ve gibsit adlı iki mineral, ekonomik açıdan işlenmeye değer kabul edilmektedir. Boksit dışındaki diğer alümina kaynakları; davsonit, kor kayaçlar, alümina killeri, alüminyum içeren kil taşları, alunite, saprolit ve sillimanit mineralleridir. (Çağatay ve Arman, 1982).

Çizelge 2.2.'de bileşikler halindeki endüstriyel öneme sahip alüminyum minerallerinden bazıları bileşik adları ve kimyasal formülleri görülmektedir. Çizelge 2.3.'te metallerin yaklaşık doğada bulunma yüzdeleri görülmektedir.

**Çizelge 2.2.** Bileşikler halindeki endüstriyel öneme sahip alüminyum minerallerinden bazıları (Ansiklopedi, 2018)

Turkuaz	: $Al_2(OH)_3 \cdot PO_4 \cdot H_2O$
Kriyolit (buz taşı)	: $Na_3AlF_6$
Zımpara taşı	: $Al_2O_3$ (saf olmayan)
Korendon	: $Al_2O_3$
Kaolin	: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$

**Çizelge 2.3.** Metallerin doğada bulunma yüzdeleri (Demircioğlu, 2002)

Element	Al	Fe	Mg	Ti	Zn	Ni	Cu	Pb
%	7,5	4,7	1,9	0,58	0,02	0,018	0,01	0,002

Çizelge 2.3.'te görüldüğü gibi alüminyumun tabiatta bulunma oranının diğer metallerden daha yüksek olmasına rağmen alüminyum kullanımı, demirin kullanılma oranına yetişememektedir. (Demircioğlu, 2002). Alüminyum pek çok mineralin bileşiminde mevcut olmakla beraber metal olarak ayrıştırılması kolay değildir. Alüminyum sadece yüz yıldır endüstride kullanılmakta oysa demir ilk çağlardan beri bilinmekte ve kullanılmaktadır. Çizelge 2.4'te 2005-2010 yılları arası dünya alüminyum

üretimleri görülmektedir. Birincil alüminyum üretiminde 2010 yılı itibariyle Kanada ve ABD ile temsil edilen Kuzey Amerika ile Doğu ve Orta Avrupa ön plana çıkmıştır. (Ankara Demir ve Demir dışı Metaller İhracatçıları Birliği, 2011).

**Çizelge 2.4.** Dünya Alüminyum Üretimleri (Bin Ton) (Ankara Demir dışı Metaller İhracatçıları Birliği, 2011)

	Afrika	Kuzey Amerika	Güney Amerika	Asya	Batı Avrupa	Doğu ve Orta Avrupa	Okyanusya	Toplam
<b>2005</b>	1,753	5,382	2,391	3,139	4,352	4,194	2,252	23,463
<b>2006</b>	1,864	5,333	2,493	3,493	4,182	4,230	2,274	23,869
<b>2007</b>	1,815	5,642	2,558	3,717	4,305	4,460	2,315	24,812
<b>2008</b>	1,715	5,783	2,660	3,923	4,618	4,658	2,297	25,654
<b>2009</b>	1,681	4,759	2,508	4,400	3,722	4,117	2,211	23,398
<b>2010</b>	1,742	4,689	2,305	2,500	3,800	4,235	2,277	24,288

Türkiye’de alüminyum endüstrisinin kurulmasına yönelik çalışmalar, 1960’lardan sonra özellikle dayanıklı tüketim mallarının imalatıyla orantılı olarak artış göstermiştir. Türkiye’de alüminyum tüketimi, 1970 yılında 20.000 tondan, 1992 yılında 150.000 tona, daha sonraki yıllarda 2005’de ise 700.000 tona yükselmiştir. (TALSAD, 2011). Türkiye’de 2,5 kg / yıl olan kişi başına alüminyum tüketimi, gelişmiş ülkelerde 30 kg / yıl olan alüminyum tüketiminin çok altındadır (MMP Ön Raporu, 2011).

Alüminyumun benzer özelliklere sahip olan diğer metallere nispeten daha ekonomik oluşu ve temin etmekteki kolaylık gibi sebeplerden dolayı alüminyum bugün dünyada kullanılmakta olan ikinci metaldir. (Kocacıçak, 1996). Alüminyum metalinin elektriksel uygulamalar dışında saf olarak kullanımı sınırlı olup, saf alüminyum; elektrik iletiminde, dekoratif amaçlı uygulamalarda ve ambalaj sanayiinde kullanılmaktadır (Kocacıçak, 1996). Çizelge 2.5.’te saf alüminyum metalinin bazı özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 2.5.** Saf alüminyum metalinin özellikleri (saflık derecesine bağlı) (Kocabiçak,1996)

---

Sembolü	: Al
Kristal yapısı	: Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Yoğunluk	: 2,7 g/cm <sup>3</sup>
Yeniden kristalleştirme sıcaklığı	: 150-300°C
Isı iletkenliği	: 645-660 (Kcal/Sa/cm/°C) (25°C)
İşlem sıcaklığı	: 300-500°C
Ergime sıcaklığı	: 660°C
Çekme dayanımı	: 39-85 MPa
Akma dayanımı	: 10-30 MPa
Sertlik	: 12-20 HB
Elastik modülü	: 7,06x10 <sup>6</sup> MPa
Kayma modülü	: 2,65x10 <sup>6</sup> MPa
Kopma uzaması	: %30-40

---

#### 2.4. Alüminyumun Tarihçesi

Eski Romalılar ve Yunanlılar, alüminyum tuzlarını, boyalarda renklerin sabitleştirilmesinde ve kanın durdurulmasında kullanmışlardır. Alum günümüz tıbbında da hala damar büzücü ve kan durdurucu olarak kullanılmaktadır. 1827’de Friedrich Wöhler susuz alüminyum klorürü, potasyum ile karıştırmak suretiyle alüminyum metal olarak ayırıştıran ilk kişi olarak bilinse de o tarihten iki sene önce Danimarkalı bir kimyacı ve fizikçi olan Hans Christian Oersted alüminyum saf olmayan bir şekilde üretmiştir (Binczewski, 1995).

## 2.5. Alüminyumun Elde Edilişi

Alüminyumun çok çeşitli mineralleri ve bileşikleri olmasına rağmen, günümüzde dünyadaki alüminyum üretiminin neredeyse tamamı  $Al_2O_3 \cdot nH_2O$  kimyasal formülündeki boksit minerallerinden sağlanır. Saf alüminyumun eldesinde iki kademeli işlem yapılmaktadır.

Birinci işlem boksit filizinin içerisindeki demir ve silisin Bayer yöntemine göre arıtılmasıdır. Bunun için alüminyumun amfoter özelliğinden yararlanır. Ham boksit sıcak haldeki NaOH çözeltisiyle işleme tabi tutulur. Bu işlemde alüminyum oksit bileşiği alüminat iyonu  $Al(OH)_4$ , silisyum oksit bileşiği de silikat iyonu vermek suretiyle çözeltiye geçer. Çözeltideki alüminat, eklenen alüminyum hidroksit kristaliyle aşıl原因arak alüminyum hidroksit şeklinde çöktürülür. Buradan alınan çökelti su ile yıkanır ve sonra  $1093^\circ C$  sıcaklığa ısıtılarak suyu alınır. Böylece beyaz alüminyum oksit tozu olan alümin elde edilmiş olur.

İkinci işlem ise saflaştırılmış alüminyum oksidin Hall-Heroult yöntemine göre  $1000^\circ C$ 'de ergimiş kriyolit banyosunda (sodyum alüminyum flüorür) çözülerek doğru akım etkisinde alüminyumun serbest bırakılmasıdır. Bu işleme göre 750 kg alüminyum metali elde etmek için 100.000 amperlik bir akım uygulanmakta ve 750 kg civarında grafit elektrot harcanmaktadır. Alüminyum reaktif bir metal olduğundan cevherinden alüminyum oksit kazanımı çok zordur. (Kavukçu, 2018). Şekil 2.1.'de alüminyum üretiminde kullanılan boksit cevheri görülmektedir.



**Şekil 2.1.** Alüminyum metalinin üretiminde kullanılan  $Al_2O_3 \cdot nH_2O$  kimyasal formülüne sahip olan boksit cevheri (Kavukçu, 2018)

Alüminyum oksitin ergime sıcaklığı  $2000^\circ C$  olduğundan ekonomik olarak üretilmekten uzaktır. Dolayısıyla, alüminyum metal formunda elektroliz yöntemiyle

kazanılır. Elektroliz yönteminde alüminyum oksit bileşiği, ergimiş kriyolit banyosu içinde çözündürülür sonra saf metale redüklenir. Bu yöntemdeki redüksiyon hücreleri 950-980°C sıcaklığında çalışmaktadır. Kriyolit doğal bir mineral olarak Grönland adasında bulunmaktadır fakat kriyolit alüminyum üretimi için sentetik halde de üretilmektedir. Kriyolit formülü  $Na_3AlF_6$  olup sodyum ve alüminyum florürlerinin karışımıdır. (Kavukçu,2018). Şekil 2.2.'de kriyolit bileşiği görülmektedir.



Şekil 2.2. Alüminyum metalinin üretiminde ara bileşik olan kriyolit (Kavukçu, 2018)

Alüminyum oksit beyaz toz halindedir ve yaklaşık %30-40 demir içerdiğinden dolayı kırmızı renkli olan boksitin rafinasyonu sonucu üretilir. Bu işleme Bayer yöntemi denilir ve Deville işleminin yerini almıştır. Wöhler işleminin yerini almış olan elektroliz yönteminde kullanılmakta olan her iki elektrot da karbondan yapılmıştır. Cevher ergimiş hale geldikten sonra mevcut iyonlar serbestçe dolaşmaya başlarlar. Katotta gerçekleşmekte olan reaksiyon ( $Al^{+3} + 3e^- \rightarrow Al$ ) denklemine göre gerçekleşerek alüminyum iyonları elektron alarak redüklenirler. Daha sonra alüminyum metali sıvı halde hücrenin tabanına çöker ve buradan dışarı alınır. Diğer taraftan pozitif elektrot olan anotta ( $2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$ ) denklemine göre oksijen gazı oluşur.

Anot elektrotunun yapısında bulunan karbon bu oksijenle oksitlenerek tükenir buna karşılık katotta oksijen çıkışı olmadığından katot tükenmez. Böylece anot elektrotlarının düzenli aralıklarla yenilenmesi gerekir. Dünya genelinde bir kilogram alüminyum metali üretebilmek için harcanan spesifik enerji tüketimi, yaklaşık 15 kW·h/kg'dır. Modern tesislerde ise bu rakam 12,8 kW·h/kg civarındadır. Alüminyum üretiminde maliyetin yaklaşık %20-40'ını elektrik enerjisi oluşturmaktadır. 2004 itibarıyla Çin alüminyum üretiminde dünya lideridir.



Dünyadaki boksit rezervleri çeşitli kaynaklara göre 20-30 milyar ton gibi verilmektedir. Bu mevcut rezervlerin %22'si Amerika, %50'si Afrika, %5'i Avustralya, %8'i Asya, %5'i ise diğer bölgelerde bulunmaktadır. Bugün bilinen dünya rezervlerinin yaklaşık %32'si görünür iken %68'i muhtemel rezervdir. Ülkemizde alüminyum cevheri olarak 200 civarında cevher potansiyeli bulunmuştur. Bunların rezervlerin toplam potansiyeli 400 milyon ton civarındadır. Çizelge 2.6.'da bazı boksit rezervlerinin kimyasal formülleri ve yüzde oranları görülmektedir.

**Çizelge 2.6.** Bazı boksit rezervlerinin kimyasal formülleri ve yüzde oranları

Alüminyum oksit	: $Al_2O_3$	% 55-65
Demir oksit	: $Fe_2O_3$	% 28'e kadar
Silisyum oksit	: $SiO_2$	% 7'e kadar
Titanyum dioksit	: $TiO_2$	% 4'e kadar
Yanma kayıpları	:	% 2-3

Alüminyum üretimi üç ana kademe gerçekleştirilmektedir. Birinci kademe boksit madeninden  $Al_2O_3$ 'nin elde edilmesidir. Bu aşamaya Bayer prosesi denilir. İkinci kademe alüminadan alüminyum üretimidir. Bu ise 50-970°C sıcaklığı arasında alüminyum oksidin redüksiyon işlemine dayanır. Bu ikinci aşama Hall-Heroult metodu olarak bilinen bir elektroliz işlemidir. Buradan çıkan alüminyumun safiyeti %99.5-99.9 oranındadır.

Üçüncü aşama %99.99 saf alüminyum elde etmek için yeni bir işlem olarak rafinasyon uygulanmalıdır. Alüminyum metal üretiminde en önemli aşama Hall-Heroult prosesidir ki yüksek oranda elektrik enerjisi gerektirir. Bu şekilde yüksek elektrik enerjisi ile üretilen alüminyum, ikinci olarak geri dönüşüm ergitmesinde %5-8 gibi çok az bir elektrik enerjisiyle ergitilebilmektedir. Alüminyum alaşımlarının sert alüminyum olarak en çok bilinenleri 7075 alüminyum, 5083 alüminyum, 5754 alüminyum, 6061 alüminyum, 6082 alüminyum, 206.0 alüminyum, 2014 alüminyum, 2024 alüminyum, 7050 alüminyum, 2007 alüminyum alaşım çeşitleridir. (Tetik, 2020). Çizelge 2.7'de bazı metallerin alüminyuma göre izafi ağırlıkları verilmiştir.

**Çizelge 2.7.** Çeşitli metallerin alüminyuma göre izafi ağırlıkları

<b>Metaller</b>	<b>Özgül Ağırlık [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>İzafi Ağırlık</b>
Mg-Alaşımları	1,8	0,64
Al-Alaşımları	2,8	1,00
Çinko	7,1	2,60
Pik	7,2	2,64
Kalay	7,3	2,66
Çelik	7,9	2,82
Pirinç	8,5	3,03
Bronz	8,8	3,14
Nikel	8,9	3,18
Bakır	8,9	3,18
Kurşun	11,3	4,03

### 3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum, demir-çelikten sonra mekanik özelliklerinin üstünlüğü sebebiyle günümüzde en çok kullanılmakta olan ikinci metaldir. Alüminyumun bazı özelliklerini şöyle sıralayabiliriz; mekanik özelliklerinin kullanıma elverişli olmasıyla birlikte mukavemet/ağırlık oranının yüksek olması, genelde korozyona karşı dayanımının iyi olması, alüminyum alaşımlarının süneklik ve dayanım açısından çok çeşitlerinin olması, kimyasal maddelere karşı dayanımlı olması, koku ve hijyen özelliklerinin iyi olması, geri dönüşümlü olması, ısı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması, parlama yapmaz ve alev almaz oluşu, manyetik olmaması, işleme ve şekillendirilmesinin kolay olması ve çok farklı yüzey işlemlerine imkan sağlamasını sayabiliriz. (Dündar ve Güngör,2002; Matsuda, Tada ve Susuma, 1991).

#### 3.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları, üretim yöntemine bağlı olarak döküm ve dövme alaşımları olarak iki ana gruba ayrılabilir.

a) Dövme alüminyum alaşımları: Kütük veya külçe halinde üretilen alaşımlardır. Bunlar dövme, haddeleme, ekstrüzyon, çekme veya diğer farklı metal işleme proseslerinden herhangi biriyle işlem görerek ara ürünler elde edilir. Daha sonra bu ara ürünler nihai ürünler için herhangi bir metot kullanılarak işlenirler. Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması Çizelge 3.1.'de gösterilmektedir.

b) Dökme alüminyum alaşımları: Nihai veya yarı nihai şeklinde dökülen parçalardır. Ve bu dökümlerin yapılmış olduğu külçe için kullanılan alüminyum alaşımları anlamına gelir. Dökme alaşım bileşimleri, dökümden sonra haddeleme, dövme, ekstrüzyon veya diğer şekillendirme işlemleri için kullanılmazlar. Alüminyum alaşım sistemindeki ilk rakam ana alaşım elementlerini ifade eder. Diğer rakamlar ise alaşımın özel kompozisyonunu belirtmektedir. (Al Saadi ve Tunay, 2017).

**Çizelge 3.1.** Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

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

Her ana grup içerisindeki alaşımlar, ısıl işlem uygulanabilir ve uygulanamaz alaşımlar olarak, iki alt gruba ayrılırlar. Isıl işlem uygulanabilir alaşımlarda, yaşlandırma ile mukavemet artışı sağlanabilirken, ısıl işlem uygulanamayan alaşımlar ise pekleşme, katı eriyik, dağılım mukavemetlenmesi ile mukavemetlendirilir. Alüminyum bakır faz denge diyagramı incelendiğinde, ötektik yapı bileşeni olan ve eriyikten ayrılan  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu ara fazı, malzemenin gevrek olmasına yol açar. Bu sebeple Al-%5Cu alaşımlarıyla döküm tekniği açısından ötektik bileşime yakın değerlerde döküm yapılması istenmez. Öte yandan katılaşma aralığının geniş olması nedeniyle yapısal aşırı soğuma özelliği dikkate alınarak

Al-%5Cu alaşımlarının bileşimindeki ağırlıkça yüzde bakır miktarı diyagrama göre %5,6Cu ile sınırlandırılmıştır. Al-%5Cu faz diyagramına göre ötektik sıcaklığın altındaki bölgede bakırın alüminyum kafesindeki çözünürlüğü azaldığı için, çökeltme sertleşmesinin ön koşullarından birisi yerine gelmiş olur. Malzemeyi gevrekleştirmeden mukavemet artışı sağlayan yaşlandırma çökeltme sertleşmesi ilk defa Al-%5Cu alaşımlarında bulunmuştur.

Plastik deformasyonla şekillendirilebilen dövme alaşımları, alüminyum döküm alaşımlardan oldukça farklı bir kimyasal bileşim ve mikro yapıya sahiptirler. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum döküm alaşımlarında; çökeltme sertleşmesi gerçekleştirilebilir. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları 2XXX, 6XXX, 7XXX serileri olarak üç ana gruptur. Isıl işlem yapılamayan alüminyum alaşımları ise çökeltme işlemiyle sertleştirilemezler. Bu alaşımların mukavemetleri sadece soğuk işlemlerle artırılabilir. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşım serileri ise 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileri olarak üç ana gruptur. (Başar, 2012).

Alüminyum alaşımları dövme ve dökme olarak iki ana gruba ayrılır. Bizim çalıştığımız alüminyum alaşımı alüminyum döküm alaşım grubundandır. Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması ve ilave edilen alaşımlama elemanına göre yapılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında uluslararası itibar edilen sınıflandırma sistemi Amerikan Aluminium Association tarafından iki metot kullanılarak yapılıyor. Döküm alaşımlarının isimlendirilmesi, üç tane rakam ve noktadan sonra bir tane daha rakamla gösterilmektedir.

Dövme alüminyum alaşımlarının isimlendirilmesi için ise dört haneli rakam sistemi kullanılan nümerik dizilim ile yapılmaktadır. Çizelge 3.2.'de alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması gösterilmiştir. Alüminyum döküm alaşım sembolündeki ilk rakam grup içerisindeki esas alaşım elementini ifade eder. Örneğin; 206.0 ikinci grup olan alüminyum bakır alaşım grubunu ifade eder. (AA, 1988).

**Çizelge 3.2.** Alüminyum Döküm Alaşımlarının Sınıflandırılması (AA, 1988)

Alüminyum Alaşımı	Temel Alaşım Elementi	Isıl İşlem Uygulanması
1xx.x	Saf alüminyum (%99,0 Al veya daha yüksek safiyette)	Uygulanmaz
2xx.x	Al – Cu ( % 4-5 Cu )	Uygulanır
3xx.x	Al – Si ( % 5-17 Si ) + Cu veya Mg	Uygulanır
4xx.x	Al – Si ( % 5-12 Si )	Uygulanır
5xx.x	Al – Mg ( % 4-10 Mg )	Uygulanmaz
6xx.x	Kullanılmıyor	
7xx.x	Al – Zn ( % 6,2-7.5 Zn )	Uygulanır
8xx.x	Al – Sn	Uygulanmaz
9xx.x	Diğer elementler	

Sınıflandırma sisteminde 1xx.x grubunda noktanın solunda bulunan iki rakam ise alaşım içindeki en az alüminyum içeriğini gösterir. Örneğin 180.x gösteriminde

%99.80 safiyette alüminyum alaşımı demektir. 2xx.x'ten 9xx.x grubuna kadar olan aralıktaki sınıflandırmada noktanın solundaki iki rakam, grup içerisindeki farklı alaşımları ifade eder. Sınıflandırma dizilimindeki noktanın sağındaki tek rakam ürünün şeklini ifade eder. Dizilimde noktanın sağında sıfır, 1 ve 2 olarak üç rakam bulunur. 0 dökümler için kullanılır. 1 rakamı hurda külçe demektir. 2 rakamı ise birincil külçe demektir.

2xx.x serisi: Al-%5Cu döküm alaşımları. Bu serideki alüminyum alaşımlarına ısıl işlem yapılabilir. Bu serideki alaşımlar yüksek dayanım, düşük akıcılık, düşük korozyon dayanımı ve düşük süneklik özellikleri gösterirler. Bu alaşımların bazı uygulama alanlarını; otomotiv endüstrisi, savunma sanayi, uzay ve havacılık endüstrisi, silindir kafaları, dişli kutuları ve dizel motorların pistonları olarak sayabiliriz.

3xx.x serisi: Al-Si-Cu/Mg döküm alaşımları. Bu serideki alüminyum alaşımlarına ısıl işlem yapılabilir. Yüksek dayanım, iyi işlenebilirlik, iyi akıcılık, düşük süneklik ve yüksek aşınma dayanımı gösterirler. Bu serideki alaşımların korozyon dayanımı düşüktür. Bu alaşımların uygulama alanları; havacılıkta birleştirme elemanları, otomobil jantları, otomobil silindir blokları, silindir kafaları, pompa veya kompresör parçalarıdır.

4xx.x serisi: Al-Si döküm alaşımları. Bu serideki alaşımlara ısıl işlem uygulanamaz. Çok iyi dökülebilme, iyi korozyon dayanımı, iyi aşınma dayanımı, mukavemet ve süneklik ise orta seviyededir. Bu alaşımlar; pompa gövdeleri ve ince kesitli dökümlerde kullanılırlar.

5xx.x serisi: Al-Mg döküm alaşımları. Bu serideki alaşımlara ısıl işlem uygulanamaz. Bu serideki alaşımlar; orta derecede dökülebilme, iyi işlenebilme ve yüksek korozyon dayanımına sahiptirler. Ayrıca yüzey anodize işlemiyle iyi derecede yüzey görünümü sağlanabilir. Kum kalıba döküm suretiyle elde edilen parçalarda kullanılırlar.

7xx.x serisi: Al-Zn döküm alaşımları. Bu serideki alaşımlara ısıl işlem uygulanabilir. Bu serideki alaşımlar bakır ilavesiyle iyi işlenebilme, iyi korozyon dayanımı, iyi boyutsal kararlılık ve iyi olmayan döküm özelliklerine sahiptirler. Bu alaşımlar yüksek korozyon direnci ve boyutsal kararlılık istenen parçaların üretiminde kullanılırlar.

8xx.x serisi: Al-Sn döküm alaşımları. Bu serideki alaşımlara ısıl işlem uygulanamaz. Bu serideki alaşımlar iyi işlenebilirlik, çok iyi aşınma direnci ve düşük

dayanım özelliklerine sahiptirler. Bu serideki alaşımlar yüksek aşınma direnci gerektiren yataklarda kullanılırlar. (Metals Handbook, 1989).

Alüminyumun saf halde kullanımı elektrik ve elektronik endüstrisi dışında çok fazla yaygın değildir. Alüminyum ekseriyetle bakır, silisyum, magnezyum, lityum ve çinko gibi elementlerle alaşım halinde kullanılmaktadır. Alüminyum döküm alaşımları, yüksek mekanik özellikler, iyi işleme kabiliyeti, iyi yüzey kalitesi, iyi akışkanlık, iyi tane yapısı kontrolü, düşük ergime sıcaklığı ve düşük gaz çözünürlüğü gibi özelliklere sahiptirler. Fakat düşük süneklik, sıcak yırtılma tehlikesi ve yüksek hidrojen çözünürlüğü gibi dezavantajlara sahiptirler. (Metals Handbook, 1989).

Alüminyum alaşımları; kum kalıba döküm, basınçlı döküm, kokil döküm, hassas döküm, sıkıştırma döküm, santrifüj/merkezkaç döküm ve sürekli döküm yöntemi gibi tüm döküm yöntemleriyle şekillendirilme özelliklere sahiptirler.

Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılmasında, üç basamaklı rakam sonra bir nokta ve bir de ondalık basamak olan bir sistem kullanılmaktadır. Örneğin, 206.1 gibi. Bu sistem sadece alüminyum döküm alaşımları için geçerli olup dövme alaşımlar için kullanılmaz. Dövme alaşımlarında dört rakam var ve nokta yoktur.

Üç basamaklı sınıflandırma ilk rakam, alaşımın içerdiği temel alaşım elementini gösteriyor. Birinci rakamdan sonra gelen ikinci ve üçüncü rakamlarla farklı alaşım çeşitleri ifade edilmektedir. Örneğin 300 serisi alüminyum alaşımlarının 308, 319 veya 356 gibi elliden fazla alaşım çeşidinin olduğunu söyleyebiliriz.

Bu alaşımların her birisi kendi içinde bazı farklılıklar gösterebilmektedir. Bu farklılıkları belirtmek amacıyla alaşımın grubunun kodunun başına A ve B gibi harfler eklenmektedir. Örneğin 206 alüminyum bakır alaşımını ele alırsak A206 ya da B206 şeklinde gösterilmektedir. Bu alaşımlar arasında, kimyasal bileşimde bulunan minör alaşım elementlerinin oranlarında bazı ufak farklar vardır. Bunun için bir örnek verecek olursak, 356 alaşımında en fazla %0,6 Fe oranına müsaade edilirken, A356 alaşımı için bu sınır değer % 0,2 Fe ve B356 alaşımında ise bu değer % 0,05 Fe'e gerilemektedir.

Üç basamaklı sayının sonuna bir de 206.0 gibi ondalık bir basamak eklendiğini görmekteyiz. xxx.0, xxx.1 ve xxx.2 gibi üç farklı şekilde olan bu sembollerin ne olduğuna bakalım. Noktanın sağındaki rakam "0" ise "döküm parça", "1" ise "hurda" ve "2" ise "birincil alüminyum ingot" olduğunu ifade eder. Eğer bir şartnamede alaşımın sonunda xxx.1 veya xxx.2 rakamı belirtilmişse, bu ifade döküm parçasını değil, döküm parçasını üretmek için ergitilecek ingotların, hurda veya birincil ingot gibi türünün belirtir.

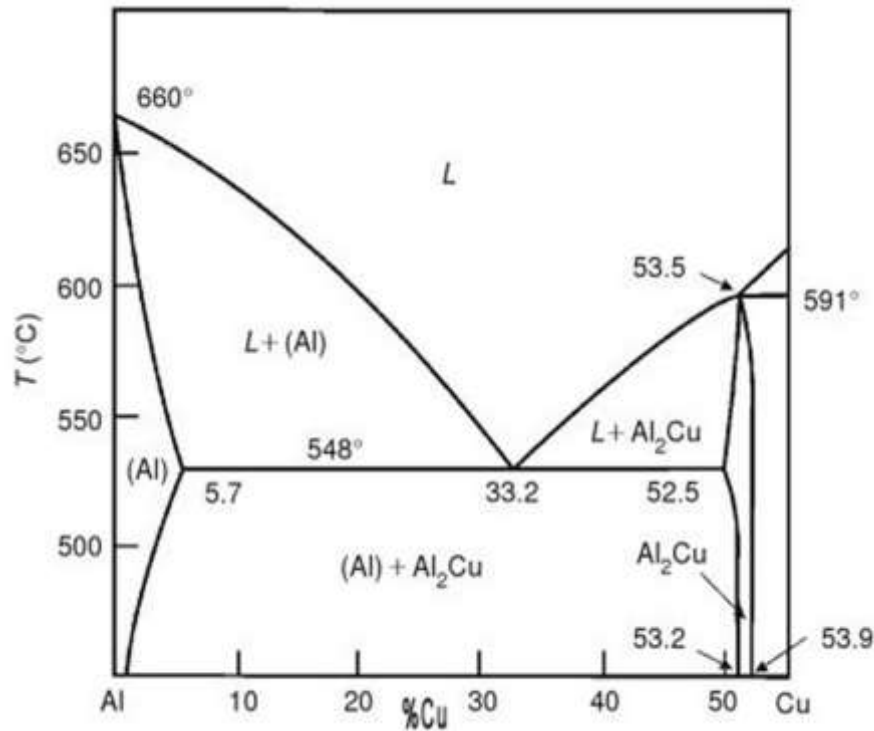
### 3.2. Alüminyum Bakır Alaşımları

Alüminyum bakır alaşımları ikinci grup olarak simgelenir ve % 2-6 Cu oranına sahiptirler. Duralümin denilen bu alaşım yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların korozyona karşı dirençleri diğer alaşım gruplarına göre düşüktür ve kaynak kabiliyetleri ise sınırlıdır. Şekil 3.1.'de Al-%5Cu faz denge diyagramının Al köşesi görülmektedir. Al-%5Cu denge diyagramına göre alüminyum bakır alaşımında bulunan bakır elementinin, 548°C sıcaklıkta %33,2 Cu içeren bir ötektik bileşik yaptığı görülmektedir. 548°C sıcaklıkta  $\alpha$ -Al fazında bakırın erirliği en fazla %5,7 Cu'dur.

Çizelge 3.3.'te  $\alpha$ -Al katı fazında bakırın çözünürlüğünün, sıcaklık değerlerindeki artışa bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Sıcaklığın artışıyla doğru orantılı bir şekilde bakırın  $\alpha$ -Al katı fazında çözünürlüğü artmaktadır. (Demircioğlu, 2002).

Çizelge 3.3. Yüksek sıcaklıklarda  $\alpha$ -Al katı fazında bakırın çözünürlüğü

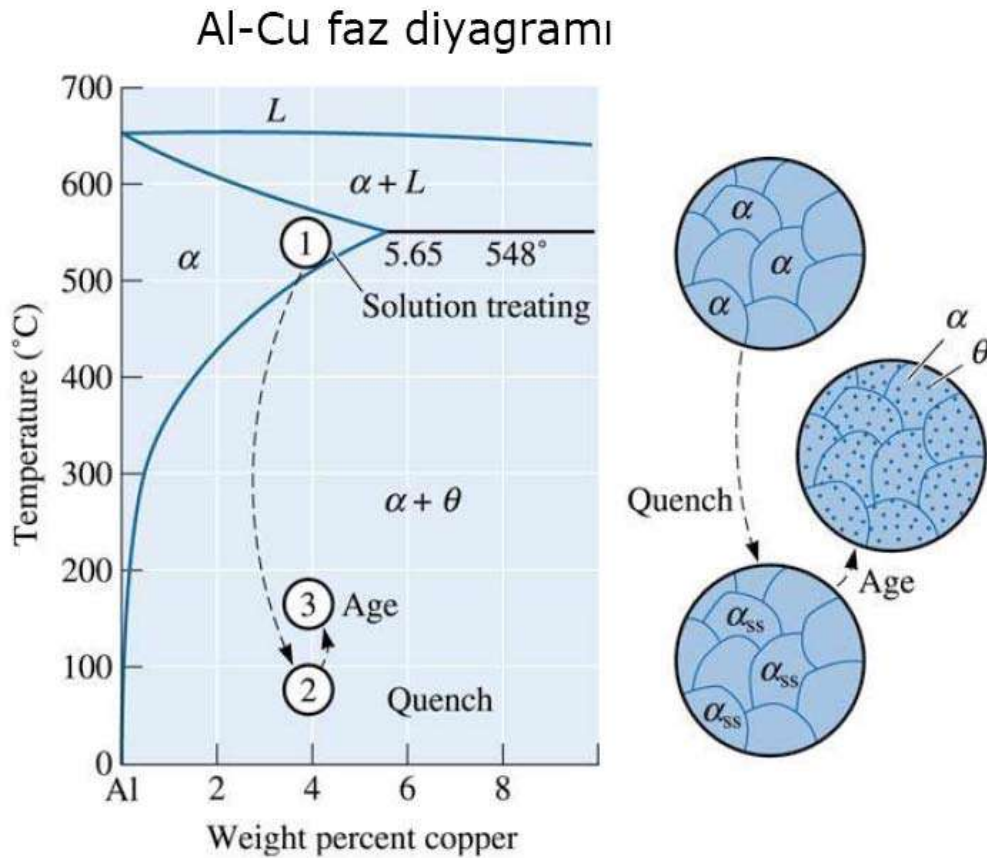
Sıcaklık (°C)	548	500	450	400	350	300	250
% Cu	5,65	4,05	2,50	1,40	0,85	0,45	0,1-0,2



Şekil 3.1. Al - Cu faz denge diyagramının Al köşesi (Zolotarevsky ve ark., 2007)



Alaşımın mukavemetleri ve sertlikleri, soğuk deformasyon işlemi veya uygun bir ısıl işlemle artırılabilir. Çökeltme sertleşmesi ya da diğer bir ifadeyle yaşlandırma ısıl işlemi, kısmen katı çözünebilirlik gösteren ve katı çözünebilirliği sıcaklıkla doğru orantılı olarak artan bir solvüs eğrisine sahip olan sistemlere uygulanabilir. (Gündüz, 2012). Şekil 3.2.'de Al-%5Cu faz diyagramınının Al köşesinde çözeltilmeye alma ve yaşlandırma işleminin aşamaları gösterilmiştir.



**Şekil 3.2.** Al - %5 Cu alaşımında yaşlandırma işleminin aşamaları (Gündüz, 2012)

Yaşlandırma sertleştirilmesi için, alüminyum bakır alaşımı, tek fazlı bir ( $\alpha$ ) yapısı elde etmek amacıyla, ötektik sıcaklığında ve solvüs çizgisinin üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır (Şekil 3.2.'deki 1 noktası). Alaşımın bünyesindeki bütün fazların tek faz içinde çözünmelerine yetecek kadar bir süre bu sıcaklıkta beklenmesi gerekir. Bu bekleme süresi parçaların kalınlıklarıyla ilgilidir. Bu işleme çözüldürme veya solüsyona alma işlemi denilir.

Çözünme işlemi tamamen gerçekleştikten sonra alaşım hızlı bir şekilde soğutulmuş su verme işlemine tabi tutulur. Böylece Şekil 3.2.'de 2 no ile gösterilen aşırı

doymuş katı çözeltili elde edilir. Şekil 3.2.'de 3 no ile gösterilen yapı ise, aşırı doymuş katı çözeltilinin kararlı hale getirilmesi amacıyla, 130-190°C arasında seçilen bir sıcaklıkta alaşım bekletilerek çökelti sertleşmesine maruz bırakılmış olur. Bu işleme yapay yaşlandırma da denilir. (Gündüz, 2012).

### 3.3. Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Alüminyum ve alüminyum alaşımları demir esaslı malzemelerden sonra endüstride kullanılan en önemli metal grubunu teşkil eder. Alüminyum alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı bazı alanlar şunlardır: Ulaşım taşıtları olarak otomobiller, uçaklar, kamyonlar, demiryolları, gemiler, bisikletler ve bunların parçalarında alüminyum alaşımları çoklukla kullanılmaktadır. Konserveler kutuları ile yiyecek saklama folyoları alüminyumdan yapılmaktadır. Paketleme ve içecek kutuları da alüminyumdan yapılmaktadır. Kapı, pencere, kaplama ve kablolama gibi yapı sektöründe de alüminyum kullanılmaktadır. Enerji nakil hatlarında, mutfak aletleri ve bıçak yapımında da alüminyum kullanılmaktadır.

Transistör CPU üretimi ve bilişim sektöründe de alüminyum kullanılmaktadır. Boya sektöründe, soğutma sanayisinde, elektrikli aletlerin bileşenlerinde ve elektrik motorlarının yapımında da alüminyum kullanılmaktadır. Asenkron motorların rotor üretiminde %99.7 saf alüminyum kullanılır. (Metals HandBook, 1992).

Günümüzde elektrik iletkenleri büyük oranda bakır yerine alüminyumdan yapılmaktadır.  $2,75 \text{ M.ohm/cm}^3$  değerinde özgül dirence sahip olan ticari alüminyumun iletkenliği bakırın iletkenliğinin %60'ı oranındadır. Alüminyumun iletkenliği, birim ağırlık esas alınarak bakırla karşılaştırılırsa o takdirde alüminyumun nisbi iletkenliği bakırdan daha yüksektir. Alüminyum haddelenerek 0,006 mm kalınlığında folyo biçiminde üretilmektedir. Alüminyum zehirli olmadığı kabul edildiğinden dolayı gıda sektöründe ve mutfak gereçlerinin yapımında kullanılır. Alüminyumun % 99,99 safiyette olanı "yüksek evsafı" alüminyum diye bilinir. Safiyetin artışı mekanik özellikleri etkiler. Saf alüminyumda demir, silisyum, titanyum ve bakır safiyeti bozan elementlerdir. (Kocabıçak, 1996).

Alüminyumun feldispat ve kaolen gibi mineralleri porselen, seramik ve çimento endüstrisinin temel maddeleridir. Doğada elmadan sonra en sert olan mineral korendon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )'dur. Korendonun içinde bileşik halinde krom bulunursa yakut meydana gelir, kobalt bulunursa safir veya akvamarin denilen kıymetli mineraller meydana gelir. Bu

taşların değeri renklerinin yoğunluğu ve berraklıkları ile artar böylelikle elmas değerine kadar ulaşır. Alüminyum, uçak kanatlarının ve gövdesinin yapımında ayrıca küçük deniz araçlarını yapımında yaygın olarak kullanılır.

### 3.3.1. Uzay ve Havacılık Endüstrisi

Alüminyum ve alaşımları 1908 yıllarında yaşlanma sertleşmesinin bulunmasıyla birlikte uçak sanayine girmiştir. Günümüzde uçak endüstrisinde Duralümin tipi alaşımlar çoğunlukla kullanılmaktadır. Hava aracı işleten ve kullanan kuruluşların en büyük problemlerinden birisi, çeşitli iyileştirmeler yaparak hava araçlarının günümüz teknolojisinden daha fazla faydalanır hale getirilmesidir. Hususiyetle askeri havacılıkta bu durum çok daha önem arz eder. Havacılık alanında, sürtünme, kaldırma kuvveti, iniş sırasında etki eden yükler, ani hızlanma veya yavaşlamalar, silah atışlarındaki geri tepmeler, aerodinamik yükler ve araçların kendi ağırlıkları gibi kuvvetler altında çalışan bu hava araçlarında güvenilirlik ve emniyet çok önemli bir unsurdur. Bu sektörde üretilen parçalar her türlü çalışma şartlarında kendilerinden bekleneni verebilmelidir. (Yurdakul, 2002).

Bazı alüminyum alaşımlarının kopma dayanımı 600 MPa değerine kadar çıkmaktadır. Genel olarak yüksek sıcaklıklarda kullanımı pek uygun olmayan bazı alüminyum alaşımları 300°C'ye yakın sıcaklıklara kadar rahatlıkla kullanılabilir. Alüminyum; tuzlu su, su, hava, bazı petrokimyasallar gibi pek çok kimyasal madde ortamında dahi yüksek korozyon dayanımına sahiptir. (Hasırcı, 2015). Yüksek mukavemetli bazı alüminyum alaşımlarının kaynak özellikleri çok iyi değildir. Bundan dolayı hava araçları perçinli birleşimler kullanılarak üretilirler.

### 3.3.2. Otomotiv Endüstrisi

Günümüzde alüminyumun yüksek olan mukavemet/ağırlık özelliğinden yararlanmak için otomobillerde alüminyum alaşımlarının kullanımı artmaktadır (Alp, 2014). Otomobillerde çoğunlukla döküm parçaları kullanılır. Geri dönüşüm özelliği dikkate alındığında alüminyum diğer bütün malzemelerden daha verimlidir. Çünkü alüminyum kalitesinden bir şey kaybetmeksizin tekrar geri dönüştürülebilir. (Eker, 2008). Otomobil ağırlığının yaklaşık %25-30'luk oranını alüminyum alaşımları oluşturmaktadır. Otomobillerde kullanılmakta olan alüminyum miktarı her sene

%10'luk bir artış göstermektedir. Alüminyum alaşımları otomobillerin piston, karbüratör, motor blok ve gövdesi, hareketli kollar, şase bağlayıcıları gibi aksamalarında kullanılırlar. (Zeren, 2012). Alüminyum parçaların mikro yapısı, döküm ve ergitme prosesine, soğuma hızına ve kimyasal bileşimine bağlı olarak gelişir. (Ceschini, 2009).

### 3.3.3. Gemi Endüstrisi

Günümüzden yaklaşık 50 yıl önceleri denizin korozif etkisine dayanıklı olan alüminyum alaşımları yapılmıştır. Deniz ortamında kullanılan alüminyum alaşımları, %2.5-6 Mg ile birlikte az miktarda Ti, Cr, Mn ve Be içermekteydiler. Bu alaşımların çekme mukavemetleri yüksek, işlenebilme ve süneklik özellikleri iyi olmakla beraber bu alaşımların dökümleri hayli zordur.

Küçük araştırma gemileri, feribot, yelkenli ve yat gibi gemilerin yapımında ve inşasında alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Şilelerde ve yolcu gemilerinde hafif oldukları için alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımları büyük askeri gemilerde, manyetik geçirgenliklerinin düşük olması ile bir avantaj sağlamaktadırlar.

### 3.4. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi

#### Bakır (Cu)

Alüminyuma ilave edilen esas alaşım elementlerindedir. En geniş kullanım alanına sahip olan alüminyum alaşımları yaklaşık %4-10 bakır içerenlerdir. Bakır alaşım elementi olarak ısıtılardan önce ve sonra dayanıklılığı ve sertliği önemli oranda artırır. %4-6Cu içeren alüminyum alaşımları ısıtılardan çok güçlü yanıt vermektedirler. Bakır genellikle korozyona karşı direnci azaltır. Bakır bazı özel bileşimlerde gerilim korozyonu hassaslığına sebep olur.

Bakır ilavesi akıcılığı düşürür ve sıcak yırtılma direncini azaltan bir etkiye sahiptir. % 1-12 oranında katılırlar. Alaşımdaki bakır miktarının artmasıyla alaşımın akıcılığı, sertliği ve çekme dayanımı artar. Bakır iç büzölmeleri azaltır ve alaşımın işlenebilme kabiliyetini artırır. Ancak sıcak yırtılmaya karşı mukavemet değerini azalttığından dökümü zorlaştırır.

### Silisyum (Si)

Silisyum alüminyum alaşımlarının döküm özelliklerini oldukça geliştirmektedir. Saf alüminyuma ilave edilen silisyum besleme özelliklerini, sıcak yırtılma direncini ve akışkanlığı önemli ölçüde artırır. Döküm işlemlerinin çoğunda alüminyum-silisyum bileşimlerini içeren alaşımlar kullanılır. Ticari alaşımlarda ötektik üstü ve ötektik altı aralıklarda yaklaşık %25 Si oranına kadar kullanılabilir. Özellikle bir miktar Mg eklenmesiyle ısıl işlem uygulanan Al-Si alaşımlarını meydana getirirler. Bu alaşımların çekme dayanımları yüksek olmayıp 13.6-15.4 Kg/mm<sup>2</sup> aralığında değişir.

Döküm işlemlerinde genel olarak silisyumun uygulanabileceği en ideal aralık; kum kalıba döküm, hassas döküm ve alçı kalıba döküm gibi yavaş soğutma hızlarında %5-7 Si, basınçlı döküm için %8-12 Si ve kokil dökümler için %7-9 Si oranındadır. Bu tavsiyelerin sebebi, akışkanlık, soğutma hızı ve ötektik üzerinde besleme oranının arasındaki ilişkidir. Silisyum ilavesi termal genişleme katsayısı ve özgül ağırlıkta azalmaya neden olmaktadır. Korozyon dirençleri, elektrik ve ısıl iletkenlikleri yüksek, genleşmeleri düşüktür. Silisyumlu alaşımların korozyon dirençleri yüksek fakat işlenebilmesi zordur. Dökme alaşımlarında %12'ye kadar olan Si alaşımının akışkanlığını ve yüksek sıcaklığa dayanımını artırır.

### Mangan (Mn)

Genelde döküm bileşimlerinde mangan elementi safsızlık olarak görülür. Kokil dökümlerin çoğunda mangan miktarının düşük olmasına dikkat edilir. Ancak manganez, dövme alaşımları için önemli bir alaşım elementi kabul edilir. Bu sebeple ikincil döküm bileşimleri yüksek oranda manganez miktarı içerebilir. Eğer malzemeye pekleşme yapılmayacaksa manganez dökme alüminyum alaşımlarında fazla bir yarar sağlamaz. Mangan tane küçültücü etkiye sahiptir.

Alaşımların korozyon direncini azaltmaksızın çekme mukavemetini artırır. Bakır ve silisyumlu alaşımlarına katıldığı zaman yüksek sıcaklıkta dökülmüş olan dökümün mukavemetini artırır. Manganın demirle birleşik yapmasına engel olmak gerekir. Yoksa teşekkül eden büyük tanecikler alaşımların mukavemet değerini düşürür. Manganın ısıl işleme her hangi bir etkisi yoktur. Alüminyum mangan alaşımlarının ergime sıcaklığı yükseltir.

## Magnezyum (Mg)

Isıl işlem uygulanabilen Al-Si alaşımlarında sertlik ve dayanıklılık gelişiminin temelini magnezyum oluşturur. Genellikle nikel, bakır ve diğer elementleri içeren karmaşık Al-Si alaşımlarında magnezyum kullanılmaktadır.  $Mg_2Si$  bileşiği sertleştirme aşamasında %0,70 Mg oranında bir çözünürlük limiti gösterir. Genel dayanıklılık istenen Al-Si alaşımlarında %0,07-0,40 oranında magnezyum kullanılır. Yüksek korozyon dayanımı ve parlak bir yüzey kaplama gerektiren uygulamalarda magnezyum kullanılır. Yumuşaklık ve dayanıklılık sunan cazip bileşimlerde magnezyum geniş oranda kullanılmaktadır.

Magnezyumun bileşim aralığı %4-10 Mg'dur. Magnezyum oranı %7'den fazla olan bileşimlere ısıl işlem uygulanabilir. Yüksek magnezyum bileşimleri dengesizliğe sebep olur. Diğer taraftan magnezyum oda sıcaklığında yaşlandırma ısıl işlemi destekler. Magnezyum ilavesi cüruflaşma meydana getirdiğinden dolayı alüminyum alaşımlarının dökümünü zorlaştırmaktadır. Bunu önlemek amacıyla malzemeye berilyum ilave edilir.

## Demir (Fe)

Al-Fe alaşımları pek fazla kullanılmazlar. Demir elementi, alüminyum alaşımlarında empürüte olarak bulunur. Demirin bazı uygulamalarda mukavemeti artırma, yüksek sıcaklıklarda sertliği artırma gibi alaşım özelliklerini iyileştirici etkileri vardır. Demir ayrıca sürekli döküm kalıplarında, sıcak çatlamaya olan direnci artırır. Bazen durumlarda da çekilmeleri azaltmak amacıyla demir ilave edilir. Demir elementinin diğer bir özelliği ise tane küçültücü olmasıdır. Yüksek silisyumlu alüminyum alaşımlarında demir miktarının fazla olması kaba kristalli, gevrek bir yapının ortaya çıkmasına neden olur. Kalıp yapışma veya kalıp dökümlerinin lehimleme eğilimi azaltır. Fakat artan demir oranı sünekliği düşürür.

Demir, reaksiyona girerek sıvı haldeki alüminyum alaşımlarında çözünmeyen fazlar teşkil etmektedir. Bu fazların en yaygın olanları  $\alpha-AlFeSi$ ,  $FeMnAl_6$  ve  $FeAl_3$  bileşikleridir. Bu çözünmeyen fazlar yüksek sıcaklıklardaki dayanıklılığı yükseltirler. Böylece artan demir oranıyla birlikte çözünmeyen fazların miktarı arttıkça döküm faktöründeki besleme ve akışkanlık gibi karakteristik özellikler olumsuz yönde

etkilenirler. Sıvı metalin tortulaşma evrelerinde demir elementi, krom, manganez ve diğer elementlere eşlik etmektedir.

#### Titanyum (Ti)

Az miktarlardaki bor ilavesiyle birlikte alüminyum döküm alaşımlarının tane boyutunu inceltmek amacıyla yaygın olarak kullanılır. %0,05-0,2 Ti oranında ilave edilirler. Basınçlı döküm alaşımlarında Ti ilavesi zararlıdır. Çünkü Ti İlavesiyle akışkanlık azalır, bu durum döküm sırasında zorluğa sebep olur. Etkin bir tane inceltme için TiB<sub>2</sub> sayısal ölçümünden fazla oranda titanyum gerekmektedir.

Titanyum genellikle sıcak ve gevrek bileşimlerdeki çatlama eğilimini azaltmak amacıyla uygulanan tane inceltme işlemlerinde kullanılmaktadır. Titanyum sünekliği ve çekme mukavemetini artırır, ısı iletkenliğini azaltır. Endüstri uygulamalarında titanyum bor ile beraber kullanılır.

#### Boron (B)

Genellikle % 0.01 B oranında kullanılır. Titanyumla birlikte iyi bir tane incelticidir. Bor kullanılmadığı durumlarda titanyumun tane küçültme etkisi ergitmede azalır. Titanyum elementi gibi bor da çekme dayanımını ve sünekliği artırır. Bor diğer metallerle birleşik yaparak Al<sub>2</sub>B ve TiB<sub>2</sub> gibi boritleri meydana getirir. TiB<sub>2</sub> eriyik alüminyumdaki TiAl<sub>3</sub> gibi aktif tane inceltici fazlarla etkileşime girerek kararlı çekirdeklenme yerleri oluştururlar.

Metalik boritler makine işlemleri esnasında takımların ömürlerini azaltır. Ve bunlar iri taneli partiküller şeklinde inklüzyonlar teşkil ederek mekanik özellikleri ve süneklik özelliğini zararlı yönde etkilerler. Yüksek bor konsantrasyonu, dökümde segregasyonu, ocakta tortulaşmayı ve inklüzyon riskini artırır.

#### Stronsiyum (Sr)

Al-Si ötektiğini modifiye etmek amacıyla kullanılır. Çok düşük seviyede stronsiyum ilavesiyle dahi etkili bir modifikasyon elde edilebilir. Kullanılan stronsiyum oranı %0,008 – 0,04 Sr aralığındadır. Yüksek Sr ilavesi döküm gözenekliliğine sebep olur. Bu gözenekler katılaşmanın daha yavaş gerçekleştiği kalın kesitli bölgelerde

görülmektedir. Yüksek stronsiyum seviyelerinde gaz giderme işlemi de olumsuz etkilenebilir.

#### Çinko (Zn)

Çinkonun alüminyuma eklenmesinin önemli faydaları yoktur. Fakat bakır veya magnezyum ilavesiyle birlikte çinko, termal işlemi ve doğal yaşlanan bileşimlerin elde edilmesini sağlar. Çinko ikincil kokil dökümlerde ve basınçlı döküm bileşimlerinde de bulunur. Çinko bazı alüminyum alaşımlarında arzu edilmeyen yabancı eleman olarak bulunur. Alaşımdaki çinko miktarlarının artmasıyla alaşımın akıcılığı artar bununla beraber yüksek sıcaklığa dayanımı azalır. Soğuma sırasında büyük çekilmeler meydana gelir. Döküm işleminden iyi bir sonuç almak için dökümün hızlıca soğutulması ve büyük çıkıcıların kullanılması gerekir.

Çinko ilavesiyle alüminyum alaşımlarının haddelenme kabiliyeti iyileşir. Özellikle magnezyumla birlikte ilave edilirse haddeleme kabiliyetini artırır. Yüksek darbe ve çekme mukavemeti de sağlar.

#### Kalay (Sn)

Kalay elementi bakır ve nikelde birlikte kullanıldığında çok dayanıklı bir alaşım oluşturur. Alüminyum alaşımlarında kalay hem düşük ve hem yüksek sıcaklıklarda dayanımı azaltır. Alüminyum alaşımlarında %0,5-1.0 Sn oranlarında olduğunda gevrekliği artırır. Kalay alüminyuma nazaran daha katodiktir. Bu nedenle korozyon direncini olumsuz etkiler. Kalayın alüminyumdaki erirliği çok düşüktür.

Kalay ilavesi sürtünmeyi önleyici bir etkiye sahip olduğu için yatak uygulamalarında kullanılır. Döküm alaşımlarında en fazla %25 Sn bulunabilir. Kalay ilavesi alaşımların işlenebilirliğini arttırmak için kullanılır. Kalay bazı alaşım sistemlerinde çökeltme sertleşmesini etkiler.

#### Gümüş (Ag)

Gümüş %0,5-1,0 aralığındaki oranlarda Al-%5Cu alaşımlarında kullanılır. Gümüş çökeltme sertleşmesine ve gerilmeli korozyon direncine katkıda bulunmaktadır.



### Nikel (Ni)

Nikel alüminyum alaşımlarına düşük oranlarda katıldığında tıpkı bakır elementi gibi sertlik ve dayanımı artırır. Alaşıma yansıtıcılık ve parlaklık vererek yüzey kalitesini yükseltir. Nikel yüksek demir oranlarının olumsuz etkilerini dengeler. Yüksek sıcaklıklarda, yüksek sertlik ve dayanım istenen alaşımlara katılır.

Alaşımlara katılan nikel miktarı % 0.5-3.0 Ni arasında değişir. Nikelin bakırla birlikte kullanılmasının amacı yüksek sıcaklık dayanımını arttırmaktır. Nikel aynı zamanda termal genleşme katsayısını azaltan bir etkiye sahiptir.

### Krom (Cr)

Genellikle % 0,1-0,6 Cr oranlarında ilave edilir. Krom tane küçültücü rol oynar ve titanyumla beraber kullanılır. Krom, Al-Zn-Mg alaşımlarına, gerilim çatlaklarını azaltmak ve korozyon direncini artırmak için ilave edilir. Kromun alüminyumdaki çözünürlüğü çok düşüktür. İkinci faz çökmesi görülmez. Bu sebeple Al-Cr alaşımlarına ısıtma işlemi yapılamaz. Yapıda teşekkül eden Cr-Al bileşiklerinin yüksek sıcaklıklarda mukavemeti artırma etkisi vardır. Krom malzemeyi korozyona karşı dayanıklı hale getirir. Krom elementi de manganez gibi alaşımın ergime sıcaklık değerini yükseltir.

Alüminyum alaşımlarına krom ilavesi, oda sıcaklığında yaşlandırma işlemi ve tane büyümesi ile oluşan kararsız termal bileşimlerde az miktarda kullanılır. Krom çok sınırlı sayıda katı-durum çözünürlüğü ortaya çıkaran  $CrAl_7$  bileşimi oluşturarak tane büyümesini engelleyici etki gösterir. Basınçlı döküm bileşimlerinde bulunan krom, bazen manganez ve demirle birlikte inklüzyonlara sebep olur. Krom bazı alaşımlarda su verme kabiliyetini ve korozyon direncini artırır.

### Kurşun (Pb)

Kurşun alüminyum dökümlerinde işlenebilirliği arttırmak amacıyla %0,1 Pb'den daha yüksek oranlarda kullanılır. Özellikle kalay ve bizmut elementleriyle birlikte kullanıldığında alaşımın işleme kabiliyetini artırır. Alüminyuma göre daha katodik olduğu için alaşımın korozyon direncini düşürür.

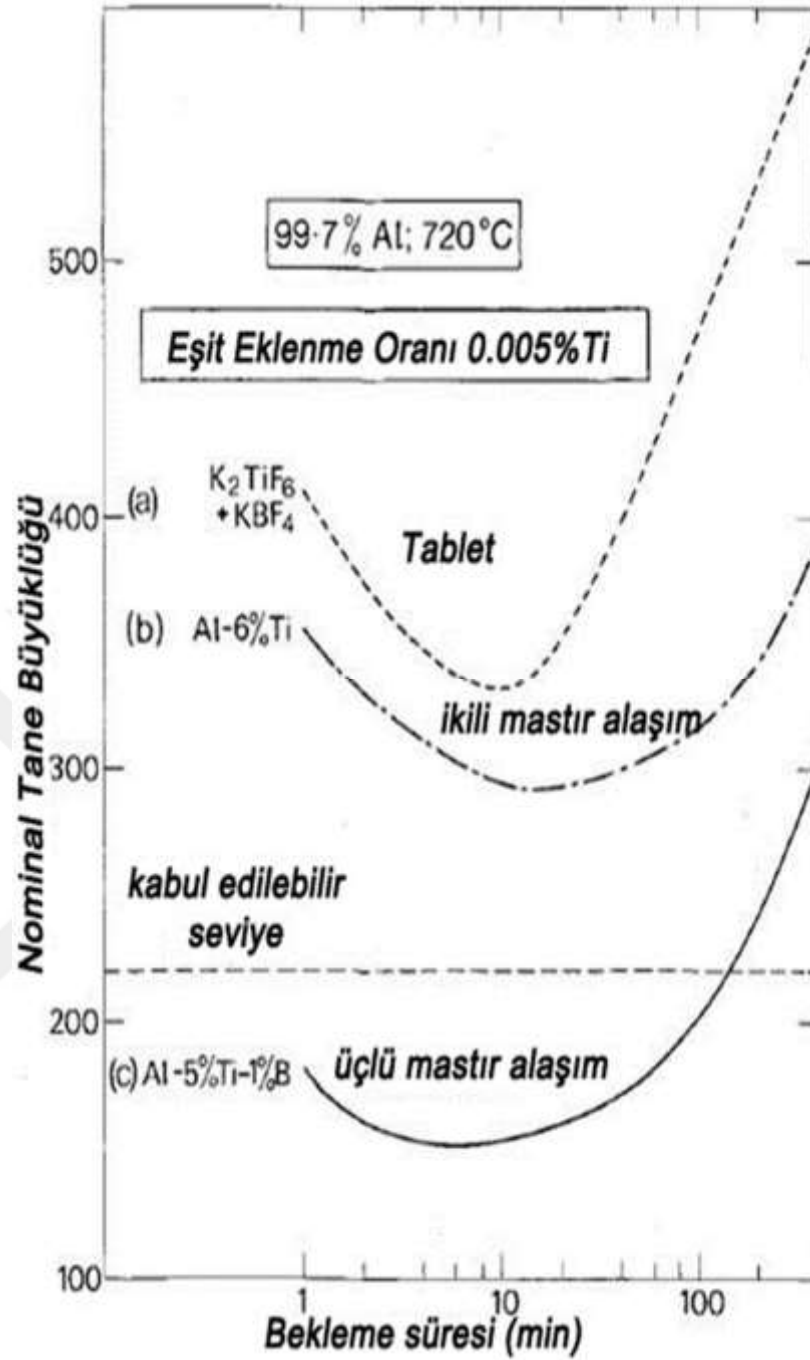
#### 4. TANE İNCELTİCİ MASTIR ALAŞIMLAR

Genellikle alüminyum alaşımları, uygun bir tane inceltici girilmesiyle tamamen eş eksenli aynı zamanda ince taneli yapıda katılaştırılabilirler. Alüminyum alaşımlarında en yaygın kullanılan tane incelticiler Al-Ti-B ve Al-Ti mastır alaşımlarıdır. Al-Ti mastır alaşımları genellikle %3-11 oranlarında titanyum içerirler (Metals HandBook, 1989). Al-Ti-B mastır alaşımları ise %2,5-11 oranında titanyum ve %0,1-2,5 oranında bor içerirler. (Çizelge 4.1). Al-Ti-B mastır alaşımlarındaki Ti:B oranı 1-50 arasındadır. (Mwamba, 2005). Çizelge 4.1’de Al-Ti-B tane inceltici mastır alaşımlarındaki Ti ve bor yüzde oranları görülmektedir.

Çizelge 4.1. Farklı Al-Ti-B mastır alaşımlarındaki Ti ve B oranları

Tür	% Ti	% B	Ti: B
<b>Al2.5Ti2.5B</b>	2,5	2,5	1
<b>Al-3Ti-1B Serisi</b>	3	1,0	3
	3	0,5	6
	3	0,2	15
	3	0,1	30
<b>Al-5Ti-1B Serisi</b>	5	1,0	5
	5	0,5	10
	5	0,2	25
	5	0,1	50

Al-Ti ve Al-Ti-B tane inceltici alaşımlarda bulunan titanyum ve borun alüminyumun tane boyutu inceltme etkileri, tablet şeklindeki tuzlardan daha etkilidir. Üçlü mastır alaşımların ikili mastır alaşımlardan daha üstün olması, borun tane inceltme performansını ortaya koymaktadır. Şekil 4.1.’de ticari safiyetteki alüminyuma, eşit oranlarda titanyum eklenmiş olan farklı tane incelticilerin karşılaştırılması görülmektedir.



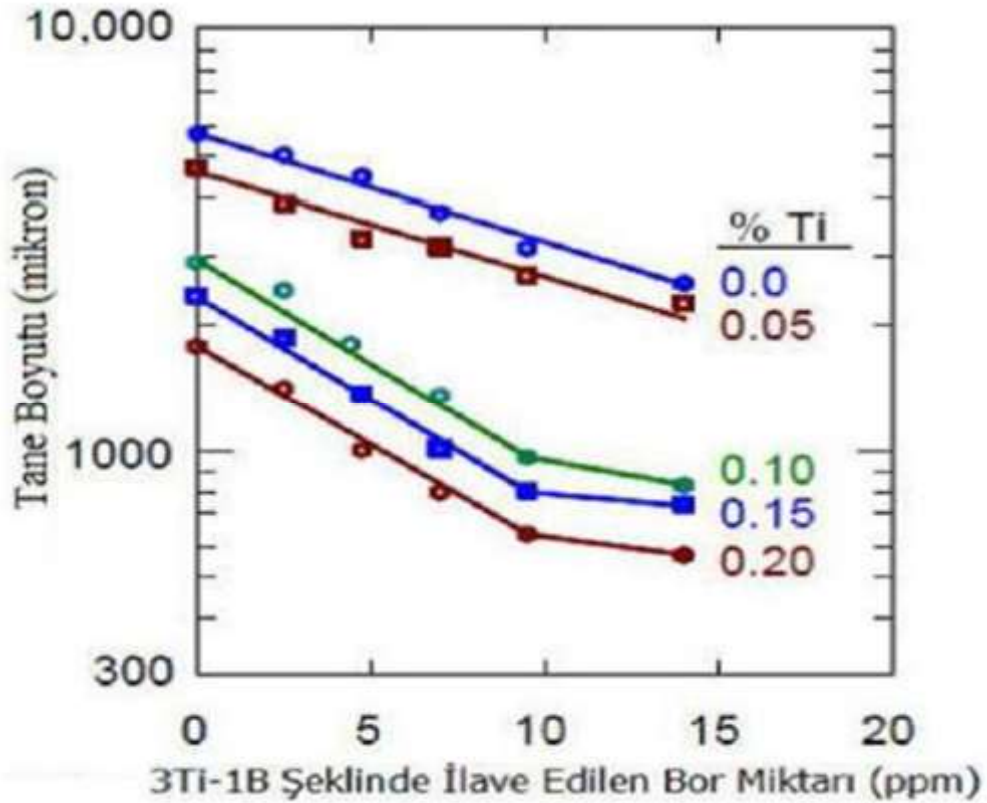
Şekil 4.1. Ticari saflıkta alüminyuma, eşit oranda titanyum eklenmiş farklı tane incelticilerin karşılaştırılması (Jones ve Pearson, 1976)

#### 4.1. Tane İnceltici Miktarları

Tane incelticilerin en etkili oldukları durum, ilavenin dökümden hemen önce yapılmış olmasıdır. Normal döküm sıcaklığında kabul edilen ilave miktarları %0,05-0,15 Ti ile %0,04 B'dur. Veya %0,01-0,08 Ti ile %0,003 B'dur. %0,003-0,008 oranlarında B ilave etmek, yüksek Si içeren alüminyum alaşımlarında tercih

edilmektedir. Daha yüksek sıcaklık değerlerinde %0,03 Ti ile beraber %0,01 B kullanılması önerilir. Tane incelticilerin bu oranlardan daha fazla ilave edilmesi, karmaşık alaşım sistemlerinde intermetaliklerin yer çekimi segregasyonuna neden olur. Borun fazla oranlarda ilavesiyle istenmeyen kalıp reaksiyonları meydana gelebilir. (Metals HandBook, 1989).

(Pasciak ve Sigworth, 2001) tarafından A319 alaşımlarıyla yapılan tane inceltme çalışmalarından elde edilen diğer bir sonuç ise Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere tane inceltici olarak bor oranı artırılrsa bile titanyum ilave etmeden etkili bir tane inceltmenin mümkün olamayacağı görülmektedir. Şekil 4.2.'de A319 alüminyum alaşımında titanyum ve bor oranlarının artışının tane boyutu inceltme etkisi görülmektedir.



Şekil 4.2. A319 alüminyum alaşımında tane inceltme sonuçları (Pasciak ve Sigworth, 2001)

## 4.2. Tane İnceltme Prosesi

Tane inceltme prosesi ile yapı içerisindeki porozitenin dağılımları, alüminyum döküm alaşımlarının yapısal özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerin başında gelmektedir. (Kashyap ve Chandrashekar, 2001). Tane inceltmiş bir döküm yapısının mekanik özellikleri yükselmekte ve yapısal döküm hataları daha az görülmektedir. Bu tane inceltme mekanizmasının anlaşılabilmesi için döküm parçalarının temel yapı taşı olan çekirdekleşme teorileri ve devamında tanenin büyüme ve teşekkül safhaları incelenmelidir.

Çoklu fazlarda tane boyutunun, yapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri tam olarak bilinmese de tekli fazların özellikleri bilinmektedir. Uygulamalarda çoğunlukla ince tane yapıları malzemeler tercih edilirler. Alüminyum bakır döküm alaşımlarının tane yapısına etki eden faktörler olarak yapının morfolojisini, tane boyutlarını ve dentrit kol uzunluklarını sayabiliriz. Fakat bu faktörler birbirlerinden ayrı olarak incelenmelidir.

Alüminyum bakır döküm alaşımının iç yapısını incelediğimizde, bir çekirdekçikten çok sayıda dentrit kollarının meydana geldiğini görmekteyiz. Bu dendritlerin uzunluğunu katılma hızı belirlemektedir. Katılma hızı yavaşladıkça dentrit kollarının uzunluğu artar. Fakat dentrit kollarının arasındaki bölgelerde daha farklı bir faz yapısının teşekkül ettiği görülmektedir. (Kashyap ve Chandrashekar, 2001).

## 4.3. Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltme Yöntemleri

Tane inceltme, ergitme sırasında aşılama yoluyla yapılır ve dökümün tane yapısının farklılaştırılması sağlanır. Bu sayede katılma sonunda daha ince yapıdaki eş eksenli taneler teşekkül etmiş olurlar. (Metals HandBook, 1989). Döküm alaşımlarının tane boyutu ergimiş sıvı metal içerisindeki çekirdekçik sayısına ve alt soğumaya bağlıdır. Soğutmanın hızlı olmasıyla daha küçük tane boyutlu yapılar elde edilmektedir. (Brown, 1999).

Ergimiş alüminyum alaşımlarına ilave edilen bazı elementler küçük boyutlu tanelerin oluşumu için çekirdekçik görevi görürler. İntermetalik faz parçacıklarına sahip olan tane incelticiler heterojen çekirdeklenmenin gerçekleşmesine katkıda bulunurlar. Tane inceltici olarak yaygın bir kullanıma sahip olan titanyum, bor ile birlikte

kullanıldığında güçlü bir çekirdekleştirici etkiye sahip olmaktadır. (Metals HandBook, 1989). Alüminyum alaşımlarında tane inceltme işlemiyle; mikro çekmelerde azaltma, sıcak yırtılmaları önleme ve hidrojen kaynaklı gaz boşluklarını en aza indirerek, sağlam döküm parçaları elde etme gibi avantajlar sağlanır. Jones ve Pearson, alüminyum alaşımlarında etkili bir tane inceltmede, tane boyutunun 220µm değerinin altında olması gerektiğini belirtmişlerdir. (Jones ve Pearson, 1976).

Etkili bir tane inceltme işlemi; kopma dayanımını artırma, besleme kabiliyetini artırma, basınç sızdırmazlık direncini artırma, ısıl işlemlere daha iyi yanıt verme, mekanik özellikleri geliştirme ve elektrokimyasal işlemler sonrası daha iyi bir görünüm gibi avantajlar sağlar. (Brown, 1999). Yeniden ergitme, sıvı metalin temizlenmesi, sıvı metalin çok yüksek sıcaklıklara çıkması ve ergimiş sıvının fazla bekletilmesi gibi durumlarda tane inceltici elemanların inceltme etkileri azalmakta veya kaybolmaktadır.

İnce taneli bir malzeme, iri taneli bir parçaya göre daha üstün mekanik özellikler sergiler. Tane boyutunu değiştirmenin ve inceltmenin bilinen en iyi yöntemi soğuma hızıyla kontrol etmektir. Dökülen her hangi bir parçanın hızlı soğuyan bölgelerinde ince taneler teşekkül ederken, yavaş soğuyan bölgelerde daha iri taneler teşekkül etmektedir.

Normal bir döküm yapıldığında ince kesitler ince taneli ve dolayısıyla daha iyi mekanik özelliklere sahip olurken, kalın kesitler ise daha kalın taneli ve dolayısıyla daha zayıf mekanik özellikler sergileyerek katılaşırlar. Hem mekanik özellikleri geliştirmek hem parçadaki ikincil fazların dağılımını kontrol altına almak ve hem de parçanın yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla, tane boyu dağılımını sadece soğuma hızına bırakmadan, eklediğimiz tane incelticilerle yukarıda saydığımız bu iyileştirmeleri sağlayabiliriz.

1930'lu yıllarından beri alüminyum alaşımlarında tane inceltme için sıvı içine titanyum ekleyerek aşılama bilinen bir yöntemdir. Günümüzde ise daha etkili bir tane inceltme etkisine sahip olan Al-Ti-B mastır alaşımları kullanılmaktadır. Mikroskobik ölçekte  $TiAl_3$  ve  $TiB_2$  parçacıkları içeren bu mastır alaşımlar sıvıya eklendiğinde, ergimiş sıvıya geçen bu küçük parçacıklar alüminyum kristallerinin çekirdeklenebilecekleri noktalar olarak görev yapmaktadırlar. Bunun sonucu olarak katılma pek çok farklı noktalardan başladığı için, katılmanın sonunda birim hacimdeki tane sayısı artmış olmaktadır.

Bu tane incelticilerin kullanımında bilinmesi gereken sorunlardan birisi tane inceltici etkinin zamanla azalması veya kaybolmasıdır. Fazla zaman kaybetmeden döküm yapılmalıdır. Bunun nedeni sadece sıvı içine ilave edilen  $TiAl_3$  gibi bileşiklerin

çözünmesi değildir. Çünkü sıvı içerisinde  $TiAl_3$  bileşiği kolay erise de  $TiB_2$  parçacıkları çözünmeden uzun süre sıvıda kalabiliyorlar. Fakat özellikle  $TiB_2$  bileşiği kullanıldığında bu parçacıklar bir süre sonra topaklanarak dibe çökme eğilimi gösterebiliyorlar. (Çetin, 2020).

#### 4.3.1. Mikro Yapılar

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda alüminyum alaşımlarının mikro yapılarının birçok faktörden etkilendiği bilinmektedir. Kontrollü katılaşıma sayesinde istenilen döküm yapıları elde edilebilir. Alüminyum bakır alaşımlarında elde edilen mikro yapı ve kimyasal bileşim, döküm prosesinin özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Basınçlı dökümlerde hızlı soğuma sayesinde ince taneli yapılar elde edilebilmektedir. Dökümün hızlı soğumasıyla aynı zamanda dentrit kol uzunluğu ve dentritik hücrelerin daha kısa oluşmasına sebep olmakta böylece malzemenin tane boyutu küçülmüş olmaktadır. (Shivukmar, Ricci, Steenhoff ve Sigworth, 1989).

#### 4.4. Tane İnceltme Prensipleri

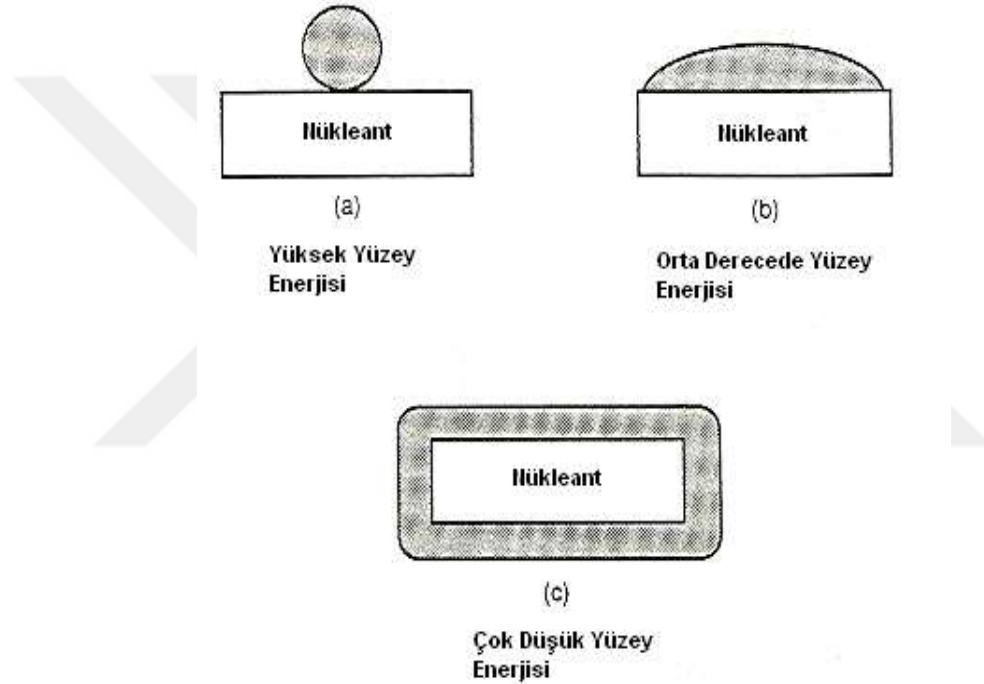
Tane inceltme işleminde ard arda gerçekleşen iki farklı mekanizma mevcuttur. Bunlar çekirdeklerin teşekkülü ile bu çekirdeklerin zamanla büyümesidir. Bu meselenin iyi anlaşılması için öncelikli olarak çekirdeklenme prensiplerini anlamak yararlı olacaktır. Çekirdeklenmeyle alakalı birden çok mekanizma vardır ve bunlar üzerindeki tartışmalar devam etmektedir. 1925 yılında Volmer ve Weber tarafından ileri sürülen sonrasında 1983 yılında Mondolfo tarafından geliştirilen çekirdeklenme teorisine göre ergimiş sıvı içindeki her bir yabancı partikül veya çekirdeklendiriciler, çekirdeklenmeyi başlatabilirler.

Heterojen çekirdeklenme teorisi denilen bu teoriye göre çekirdeklendirici alt tabaka ve katılaştan çekirdek arasında ara yüzey enerjisinin belirleyici etkiye sahip olduğu önem arz etmektedir. Bu çekirdeklenme teorisine göre çekirdeklendirici ve çekirdek arasında üç olasılık mevcuttur. (Mondolfo, 1983).

Bu olasılıklar yüzey enerjisinin çekirdek geometrisine etkisi şeklinde açıklanabilir. Yüzey enerjisi çekirdeklendirici üzerinde, çok düşük, orta derecede ve yüksek olarak üç şekilde etkileşim göstermektedir. Şekil 4.3.'te yüzey enerjisinin çekirdeklendirici üzerindeki çekirdek geometrisine etkileri şematik olarak

görülmektedir. Çekirdeklendirici ve çekirdek arasında yüzey enerjisinin en az olduğu durum optimum değer olarak ifade edilir. Bu durumda çekirdek, çekirdeklendiriciyi tam olarak sarar entropi kanunları gereğince en az enerji harcayarak büyük çaplı bir tabaka oluşturur (Mondolfo, 1983). Çekirdeklendirici ve çekirdek arasındaki ara yüzey enerjisinin en az olduğu durum optimum olarak ifade edilir

(Şekil 4.3.c). Bu durumda çekirdek, çekirdeklendiriciyi tam olarak çevreler, entropi kanunları uyarınca en az enerji harcayarak çekirdekçik üzerinde bir tabaka teşkil eder. (Mondolfo, 1983).



**Şekil 4.3.** Ara yüzey enerjisinin çekirdeklendirici üzerindeki çekirdek geometrisine etkisi (a) Çekirdekçik-yüksek yüzey enerjisi etkileşimi (b) Çekirdekçik-orta derecede yüzey enerjisi etkileşimi (c) Çekirdekçik-çok düşük yüzey enerjisi etkileşimi (Mondolfo,1983)

Heterojen çekirdeklenmeyi alüminyum alaşımları için irdelersek, çekirdekçiğin kristal latisindeki atomik düzlemlerin, bunun üzerinde teşekkül eden çekirdeğin kristal latisindeki atomik düzlemleriyle uyumlu olması gerekir. Yani çekirdeklendirici ile alüminyum arasında kristalografik ilişkinin uyumlu olması gerekir. Bunun için en uygun bileşiğin  $TiAl_3$  olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. (Guzowski, Sigworth ve Senter, 1987).

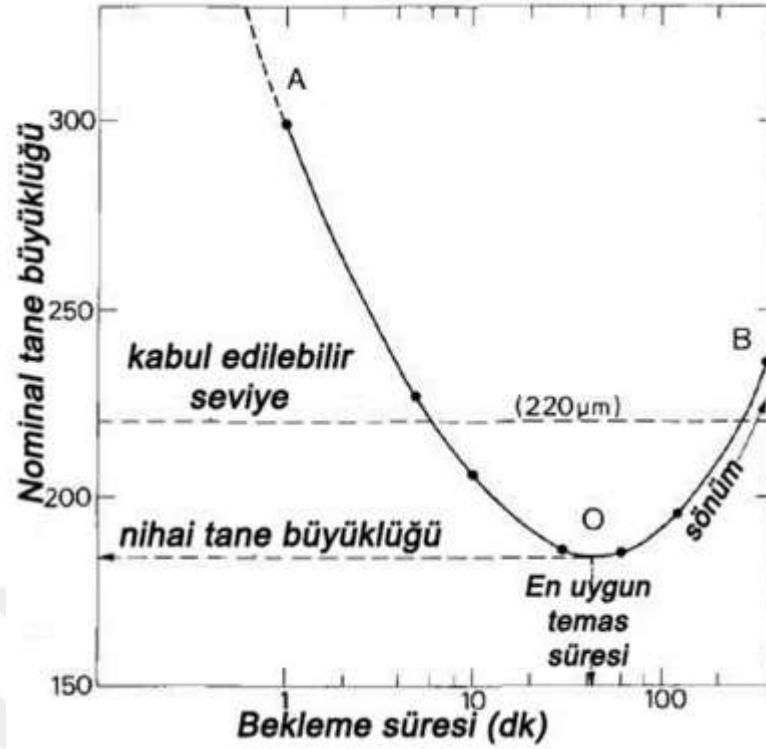
Ergimiş sıvı alüminyum alaşımlar, oksit bileşiminde pek çok yabancı partikülleri içerirler. Ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, alüminyum alaşımının yapısındaki



inklüzyonların etkin birer çekirdekçik olmaları, her ikisinin kristal yapılarının birbirleriyle uyum sağlamalarına bağlıdır. Alaşımın likidüs sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda uyumlu veya benzer kristal yapıdaki çekirdekçikler daha iyi çekirdeklenme sağlarken uyum ve benzerliği az olan partiküller daha çok soğumaya ihtiyaç duyacaklardır. Buna çil etkisi denilir. Bu sayede heterojen çekirdeklenme sonunda oldukça ince yapıdaki tanecikler ortaya çıkmaktadırlar. Çil etkisinin uygulanamadığı veya sınırlı uygulandığı durumlarda kimyasal tane inceltici denilen çekirdeklendiriciler eklenerek tane inceltme gerçekleştirilir. (Guzowski, 1987).

#### 4.4.1. Tane İnceltme Eğrileri

Şekil 4.4.'te döküm alaşımlarında sıvı metal içine ilave edilen tane incelticilerin bekleme süresine bağlı olarak tane boyutunun değişimi görülmektedir. Şekil 4.4.'te görülen tane inceltme eğrisi iki farklı bölümden meydana gelmektedir. Tane inceltici ilave edildikten sonra, ilk bölümde tane boyutu zamanla küçülür. (Şekil 4.4.'teki "A-O" çizgisi). "O" noktasında tane boyutu en küçük seviyeye ulaşır. Bu noktaya "nihai tane boyutu" denir. Bu nokta tane incelticinin bekleme süresini gösterir. "O" noktasından sonra ergimiş alaşım dökülmeyip bekletilirse tane boyutunda büyüme başlar. Şekil 4.4.'te görülen yukarı doğru yükselen "O-B" çizgisi "sönüm" olarak ifade edilir. (Murty ve ark., 2002).

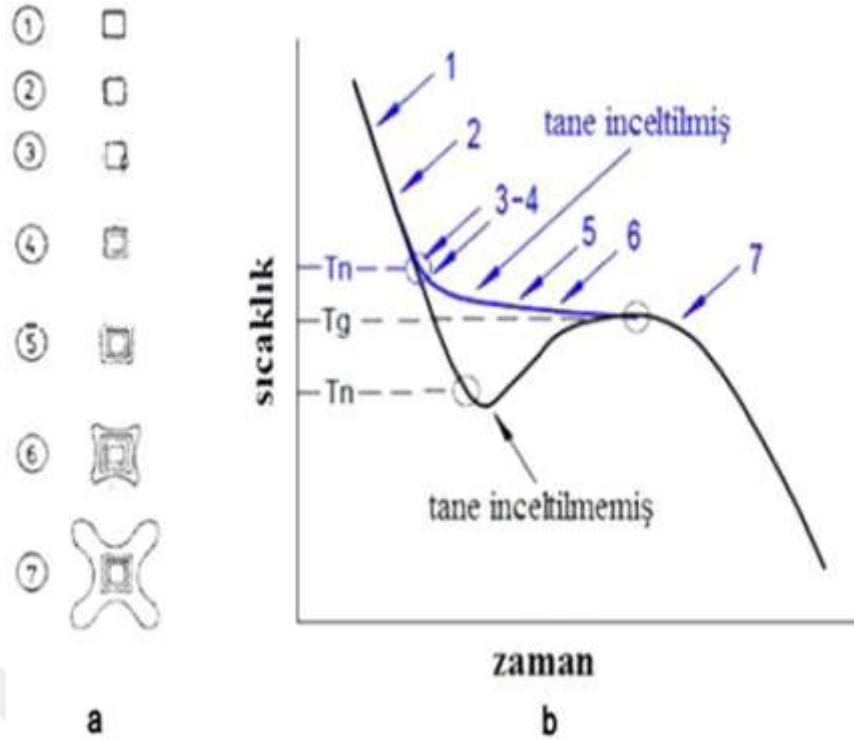


Şekil 4.4. Döküm alaşımlarında bekleme süresine bağlı tane inceltme eğrisi

#### 4.4.2. Tane İnceltme İşleminin Soğuma Eğrisine Etkisi

Backerud, (1983) katı  $TiAl_3$  bileşik partikülleri üzerinde alüminyumun çekirdeklenecek büyümesini böylece tane inceltme mekanizmasını Şekil 4.5.'deki şema ile açıklamıştır. Sigworth ve Kuhn, (2007) aynı şemayı Şekil 4.5.b'de gösterilen diğer bir şematik soğuma eğrisiyle ilişkilendirerek göstermişlerdir. Buna göre, alaşıma ilave edilen tane inceltici mastır alaşım içerisinde çok sayıda  $TiAl_3$  intermetalik bileşik bulunmaktadır.

Dökümden hemen önce tane inceltici ilave edildiğinde milyonlarca sayıda mikroskobik  $TiAl_3$  partikülleri sıvı metal içerisine dağılmaktadırlar. Bu partiküller çekirdekçik olarak davranmaktadırlar. Şekil 4.5.'de tane inceltilen ve tane inceltilmeyen alaşımların soğuma eğrileri ile alüminyumun  $TiAl_3$  partikülleri üzerinde çekirdeklenecek büyümesi sırasında geçirdiği aşamalar şematik olarak görülmektedir.



**Şekil 4.5. (a)** Alüminyumun TiAl<sub>3</sub> partikülleri üzerinde çekirdeklenecek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi, **(b)** Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı alüminyumun soğuma eğrilerinin gösterimi (Sigworth ve Kuhn, 2007)

Bu çekirdekçiklerden birisini Şekil 4.5.'de şematik gösterimde 1 ile gösterilen parçacık olarak varsayabiliriz. TiAl<sub>3</sub> bileşiği sıvı alüminyumla temas ettiği zaman çözünmeye başlar. Bu çözünme sonucu partikülün çevresinde partikül ile temas halinde olan alüminyum titanyum yönünden zenginleşmeye başlar. Bu durum Şekil 4.5.'de 2 no ile gösterilmektedir. Alüminyum bakır faz diyagramından da görüleceği üzere ilk önce partikül çevresinde titanyumca zengin sıvı, ana metale oranla daha yüksek likidüs sıcaklığında olması nedeniyle katılaşmaya başlayacaktır.

Şekil 4.5.'de 3 no ile gösterilmektedir. Bu partikül yüzeylerinde ilk çekirdeklenme başlamış olacaktır. Bu şekilde 4 ve 5 nolu skeçlerde gösterildiği üzere bu çekirdekçik partikülü kendi etrafındaki titanyumca zengin alüminyumunu kendisine bağlayarak büyümeye devam edecektir. Bu büyüme sıvı tükenince duracaktır. Metal soğumaya devam etmekle bu kez çekirdeklerin etrafında dentritik büyüme başlayacaktır. Bu durum 6 ve 7 noktalarında gösterildiği şekilde devam edecektir.

Şekil 4.5.b TiAl<sub>3</sub> partiküllerinin tane inceltme etkilerini soğuma eğrisine yansıtması yönünden de önemlidir. Tane inceltici eklenmemiş olan bir alaşımın soğuma eğrisini inceleyelim. Çekirdeklenmenin kendiliğinden gerçekleşmesi için sıvının T<sub>g</sub> sıcaklığı (büyüme) altında başka bir T<sub>n</sub> sıcaklığına (çekirdekleşme sıcaklığı) kadar

birkaç santigrat derecelik bir alt soğuma gerçekleştirmesi gerekir. Buna karşılık tane inceltici eklenmiş bir alaşımın soğuma eğrisi Tg sıcaklığının üzerinde şekilde 3 ve 4 ile gösterilen noktalarda alüminyumun çekirdeklenebildiğini göstermektedir.

#### 4.5. Tane Boyutu Ölçüm Teknikleri

##### 4.5.1. Alan Ölçümsel (Planimetrik) Yöntem

ASTM farklı ortalama tane boyutlarına sahip 10 farklı tablo hazırlamıştır. Bu tablolar, tane boyutu numarası 'G' değerinin 1 ile 10 arasında değiştiği aralıklardaki değerleri göstermektedir. ASTM E112-13 standardı, metallerin ve metalik alaşımların tane boyutu hesaplama yöntemi standardıdır. Adlandırma

$$N = 2^{G-1} \quad (4.1)$$

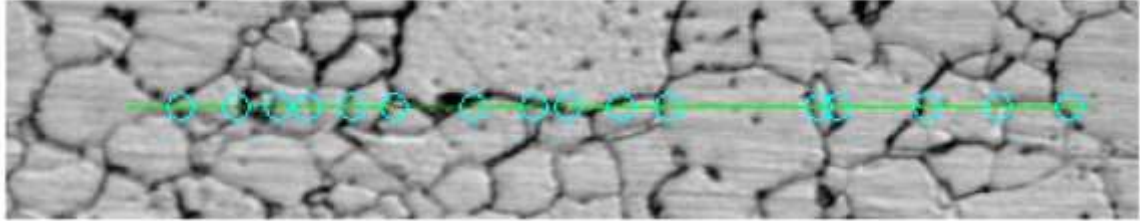
formülüne göre yapılmaktadır. N, X100 büyütmede çekilmiş bir mikro yapı görüntüsünde 1 inç kare alanda yer alan tane sayısıdır. Örneğin G = 6 olarak verilen bir çelik numunede X100 büyütmede 1 inç kare alanda 32 tane bulunmaktadır. Çizelge 4.2.'de rastgele yönlenmiş eş eksenli taneler için tane boyutu mukayese cetveli görülmektedir.

Çizelge 4.2. Rastgele yönlenmiş eş eksenli taneler için tane boyutu mukayese çizelgesi

Grain Size No. G	$N_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{l}$ Mean Intercept		$N_L$ No./mm
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	$\mu$ m <sup>2</sup>	mm	$\mu$ m	mm	$\mu$ m	
0.0	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0458	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	486.00	0.00202	2018	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1428	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0236	23.6	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	358	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.00
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.00
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63486.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.00

### 4.5.2. Kesişim Yöntemi

Şekil 4.6.'da tane boyutu belirleme yöntemlerinden olan kesişim yöntemi görülmektedir.



Şekil 4.6. Tane Boyutu belirleme kesişim yöntemi

Kesişim yöntemi, rastgele seçilmiş doğruların kaç farklı taneyi kestiği esasına dayanan tane boyutu ölçüm yöntemidir. İstatistiki olarak güvenilir ortalama tane boyutu verisi için en az 50 taneyi kesecek çizgiler çiz. Çizginin kestiği taneler ya da tane sınırları sayılarak hesaplama yapılır. Eğer çizginin kestiği taneler sayılıyorsa, çizginin uçlarında kalan taneler yarım kesişim olarak hesaplanır. Eğer çizginin kestiği tane sınırları sayılıyorsa, 3 tanenin kesiştiği noktalar 1.5 kesişim olarak hesaplanır.

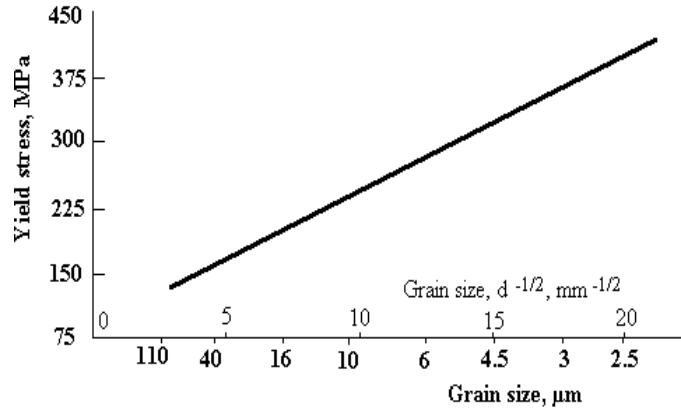
### 4.5.3. Hall-Petch Bağıntısı

Şekil 4.7.'de tane boyutunun akma dayanımı ile ters orantılı olduğu görülmektedir.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y / \sqrt{d} \quad (4.2)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (4.3)$$

Malzemelerin akma dayanımı ve ortalama tane boyutu değerleri arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Ortalama tane boyutu değeri küçüldükçe akma dayanımı değerleri artmaktadır. Bu ilişkiyi Hall-Petch denklemi ifade etmektedir. Denklemdaki  $\sigma_0$  ifadesi malzemenin ideal şartlardaki başlangıç akma dayanımını ifade eder.  $k$  ise sabittir.



Şekil 4.7. Hall-Petch eşitliğine göre Tane boyutu ve akma dayanımı ilişkisi

## 4.6. Çekirdeklenme

Tane çekirdeklenmesi ile tane büyümesi katılaşma sırasında gerçekleşen iki önemli mekanizmadır. Çekirdeklenme mekanizması yarı kararlı sıvıdan sıcaklığın azalmasıyla kristallerin teşekkül etmesiyle termal olarak aktive edilmiş olan bir süreçtir. Çekirdeklenme mekanizmaları, homojen çekirdeklenme ve heterojen çekirdeklenme olmak üzere ikiye ayrılır.

### 4.6.1. Homojen Çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenme durumunda, sıvı metalin kalıp duvarlarıyla temas etmediği, sıvının içinde çekirdeklenmeyi başlatacak herhangi bir katı partikülün veya gaz boşluğunun olmadığı kabul edilir. Böyle bir durumda sıvının her noktasında çekirdeklenme ihtimali eşittir.

Ergime sıcaklığının altındaki  $\Delta T$  sıcaklığında  $G_1$  serbest enerjisine sahip olan belli bir hacimdeki sıvı atomlarının bir kısmı kendi aralarında bir araya gelerek katı bir küme oluşturduklarında sistemin serbest enerjisi  $G_2$ 'ye dönüşecektir. Eşitlik 4.4.'de  $\Delta G$  değişim formülü ile verilmiştir.

$$\Delta G = G_2 - G_1 \quad (4.4)$$

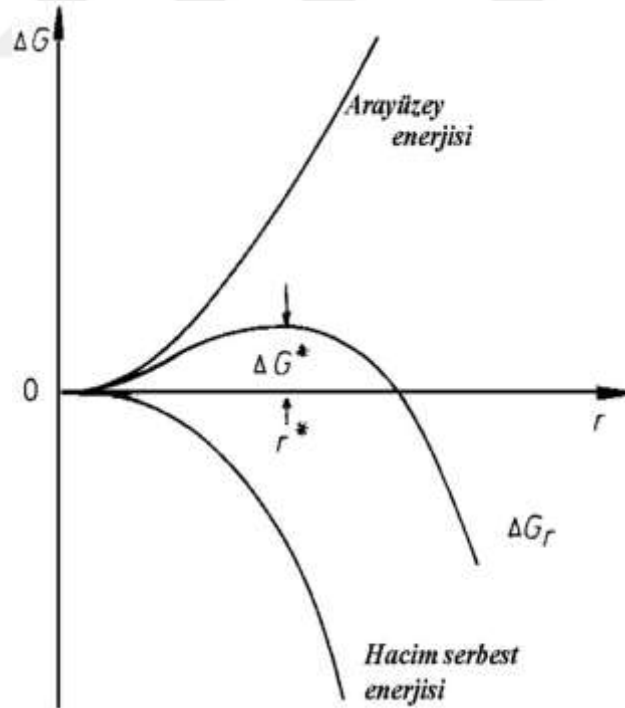
Serbest enerji toplam değişimi Eşitlik 4.4.'ün yeniden düzenlenmesiyle Eşitlik 4.5.'te gösterildiği gibi olacaktır.

$$\Delta G = -V_K \Delta G_V + A_{KS} \gamma_{KS} \quad (4.5)$$

Eğer katı-sıvı ara yüzeydeki serbest enerji izotropik ise bu takdirde oluşan katı küre şeklindedir. Bu durumda toplam serbest enerjideki değişim Eşitlik 4.5.'te ifade edildiği gibi olur.

$$\Delta G_T = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{KS} \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6'da verilen  $\frac{4}{3}\pi r^3$  yarıçapı r olan küresel çekirdekçığın hacmidir.  $4\pi r^2$  ise küresel çekirdekçığın ara yüzey alanıdır.  $\Delta G_V$  negatif hacim serbest enerjideki değişim ve  $\gamma$  ara yüzey enerjisidir. Çekirdekçığın kararlı olması için  $\Delta G_T$  negatif olmalıdır. Çekirdekçığın oluşması serbest enerji değişimine negatif katkıda bulunur. Fakat katı-sıvı ara yüzeyinin oluşmasından dolayı da pozitif bir katkı mevcuttur. Şekil 4.8.'de r yarıçaplı bir kürenin homojen çekirdeklenmesinde serbest enerji değişimi görülmektedir.

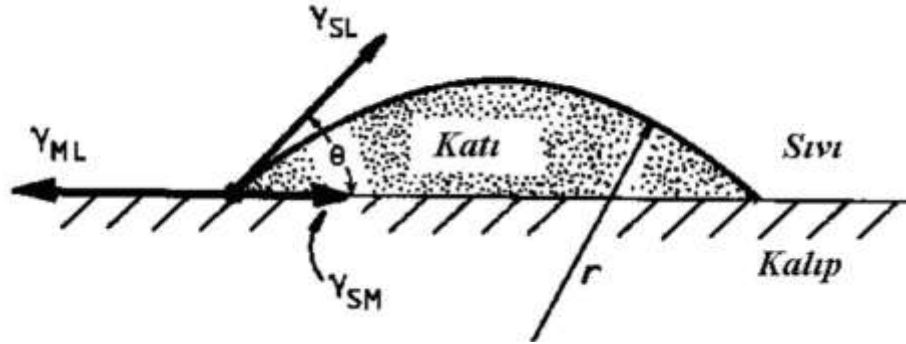


Şekil 4.8. Kritik ( $r^*$ ) yarıçaplı bir kürenin homojen çekirdeklenmesinde serbest enerji değişimi (Porter ve Easterling, 1990)

Eğer teşekkül eden katının yarıçapı olan ( $r$ ), kritik yarıçap olan ( $r^*$ )’dan büyük ise bu durumda kararlı katı partiküllere çekirdek denir ve çekirdek büyür. Katının yarıçapı, kritik yarıçaptan küçük ise bu durumda oluşan çekirdek büyümmez ve tekrar erir. Fakat katının yarıçapı, kritik yarıçapa eşitse bu durumda çekirdek, kendi etrafını saran sıvıyla kararsız ve dengededir.

#### 4.6.2. Heterojen Çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenmede kritik büyüklükteki küre çekirdekçiğin teşekkülü dikkate alınmıştır. Heterojen çekirdeklenmede ise çekirdeğin tamamen küre şeklinde olması gerekli değildir. Kesik küre şeklindeki embriyo yüzeyi çekirdekleyici tarafından kararlı hale getirildiği takdirde embriyo, embriyo yüzeyinin genişlemesiyle çekirdek haline gelir. Bu şekilde teşekkül eden çekirdek, küre şeklindeki çekirdekten çok daha az sayıda atom içerir. Şekil 4.9.’da düzlemsel bir kalıp duvarında kesik kürenin heterojen çekirdeklenmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Heterojen çekirdeklenmede alt tabaka, çekirdekçik ve sıvı arayüzey enerjileri. Düzlemsel bir kalıp duvarında kesik kürenin heterojen çekirdeklenmesi (Porter ve Easterling, 1990)

Şekil 4.9.’da üç ara yüzey enerjilerinin oluşumu vardır.  $\gamma_{KS}$  ve  $\gamma_{DK}$  pozitifdir ve katılaşma sırasında çekirdeklenme prosesiyle oluşan ara yüzeyden kaynaklanır.  $\gamma_{DS}$  ise kesik kürenin altında kalıp-sıvı ara yüzeyinin kaybolmasından kaynaklanır ve negatiftir. Heterojen çekirdeklenmede serbest enerji değişimi Eşitlik 4.7’deki gibi olur.

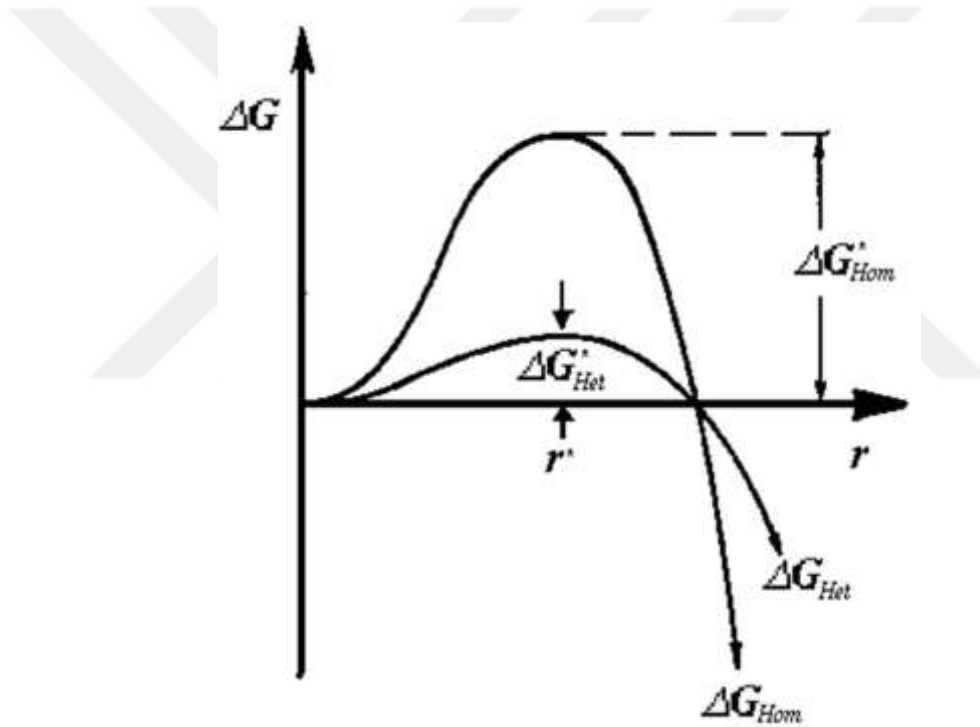
$$\Delta G_{H\epsilon t} = -V_K \Delta G_V + A_{KS} \gamma_{KS} + A_{KD} \gamma_{KD} - A_{KD} \gamma_{DS} \quad (4.7)$$



Eşitlik 4.7'deki ıslatma açısı ( $\theta$ ) ve kesik kürenin yarıçapı dikkate alınarak Eşitlik 4.8.'deki gibi yazılabilir.

$$\Delta G_{Het} = \left( -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_V + 4 \pi r^2 \gamma_{KS} \right) \cos \theta \quad (4.8)$$

Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi kritik çekirdek yarıçapı homojen ve heterojen çekirdeklenmede aynıdır. Yalnız kritik çekirdek hacmi değişir. Bu sebepten çekirdekleyici, esas olarak çekirdeklenmeye karşı gelen ara yüzey enerjisini düşürür. (Porter ve Easterling, 1990). Şekil 4.10.'da homojen ve heterojen çekirdeklenmede oluşan katının kritik serbest enerji değişimi görülmektedir.



Şekil 4.10. Homojen ve heterojen çekirdeklenmede oluşan katının kritik serbest enerji değişimi (Porter ve Easterling, 1990)

### 4.6.3. Çekirdeklenme Teorileri

Al-Ti-B mastır alaşımlarının alüminyum alaşımlarına ilave edilmesinden sonra gerçekleşen alüminyum tane inceltme mekanizmaları üzerindeki tartışmalar devam etmektedir. Bu konularda çeşitli tane inceltme mekanizmaları ileri sürülmüş fakat kesin bir fikir birliği henüz ortaya çıkmamıştır. Tane inceltme mekanizmaları konusunda yapılan ilk çalışmaları Glasson, McCartney ve Emley yapmışlardır. Easton ve St. John

yakın bir zamanda mevcut çalışmaları araştırmış ve bunları çözünen teorisi ve çekirdeklenme teorisi olarak iki başlık altında sınıflandırmıştır. Bu tasnifteki çekirdeklenme teorileri alüminyum alaşımlarındaki heterojen çekirdeklenmeyi ele almaktadır.

Çözünen teorisi, sıvı alüminyum içinde çözünen elementlerin, tane inceltmedeki etkisini ele almaktadır. Şimdiye değin tane inceltme mekanizmalarına uygulanabilen bu teoriler altı grupta incelenmektedir. Bunlar karbür/borür teorisi, peritektik hulk teorisi, faz diyagramı/peritektik teorisi, çift çekirdekleşme teorisi, çözünen teorisi ve hiper çekirdeklenme teorisidir. (Murty ve ark., 2002).

#### 4.6.3.1. Karbür / Borür Teorisi

Karbür borür teorisi ilk önce Cibula tarafından ileri sürülmüş, Jones ve Pearson tarafından da desteklenmiştir. Bu teoriye nazaran, Al-Ti mastır alaşımının tane inceltme etkisi, alaşım içerisinde hiçbir karbon eklentisi olmasa dahi TiC çekirdeğinin mevcudiyetine bağlıdır. Bu teoriyi desteklemek amacıyla ileri sürülen görüşe göre çok düşük miktarlardaki karbon seviyeleri, TiC oluşumunu desteklemek için yeterlidir. Alüminyum eriyiğinin içindeki TiC'ün kararlılığı üzerinde görüş ayrılığı olmasına rağmen Reif ve Banerji alüminyum için etkili tane inceltici olan Al-Ti-C mastır alaşımlarını üretmişlerdir.

Zheng, Cisse Rapp, Gruzleski ve Mohanty de aynı şekilde TiC bileşiğinin alüminyum alaşımları için iyi bir çekirdekleştirici olduğunu ifade etmişlerdir. Banerji ve Reif, Al-Ti-C mastır alaşımlarının tane inceltici olarak yararlarıyla alakalı yaptıkları çalışmalarda kristalleşme merkezlerinin karbon ve titanyumca zengin olduğunu göstermişlerdir. Bu durum Cibula'nın TiC bileşiğinin alüminyum için çekirdekleştirici olduğu görüşünü desteklemiştir. Fakat TiC parçacıklarının sıvı alüminyuma doğrudan ilavesi verimsiz bir tane inceltme etkisi sağlamaktadır.  $TiB_2$ ,  $AlB_2$  ve  $(Al,Ti)B_2$  gibi borürleri tane inceltici olarak kullanmak istediğimizde bu borürler Al-Ti-B mastır alaşımlarında mevcuttur. (Murty ve ark., 2002).

Cibula, Pearson ve Jones, titanyum ve bor tuz veya mastır alaşım formunda sıvıya katıldığında  $TiB_2$  parçacıklarının sıvı alüminyum içinde dağılarak alüminyum kristalleri için çekirdekçi merkez olarak davrandıklarını ileri sürmüşlerdir. Bir grup araştırmacı, Al-Ti-B mastır alaşımları ile tane inceltme üzerinde çalışmışlar, alüminyum kristal tanelerinin merkezinde borür kümeleri meydana geldiğini tespit

etmişlerdir. Nötronla aktif edilmiş bor öz ışın çizimlerinde, çekirdekte hem titanyum hem de bor mevcudiyeti görülmüştür. Ancak Marcantonio, Maxwell, Hellawell ve Mondolfo  $TiAl_3$ 'ün mevcudiyetinde  $TiB_2$  ve  $TiC$ 'e göre alüminyumun çekirdeklenme işleminde çok az alt soğuma gerektiğini veya hiç alt soğuma gerektirmediğini belirtmişlerdir. Böylece  $TiAl_3$ 'ün,  $TiB_2$  ve  $TiC$ 'e göre daha iyi çekirdekleştirici olduğunu göstermişlerdir.

Davies ve arkadaşlarına göre,  $TiB_2$  sıvı alüminyum içinde düşük ara yüzey enerjisine sahip olduklarından dolayı alüminyum için etkili bir çekirdekleştirici olmadığını iddia etmişlerdir. Davies ve arkadaşları, alüminyum tanelerindeki  $TiAl_3$  bileşimini inceleyerek bu bileşiklerin iyi bir çekirdekleştirici olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca Davies, Kobayashi ve Arnberg gibi araştırmacılar bu görüşü,  $TiAl_3$  ve alüminyum arasında çok yönlü, yönelim ilişkilerinin mevcudiyetine kanıt sunarak desteklemişlerdir. Diğer yandan  $TiB_2$  ve alüminyum arasında her hangi bir yönelim ilişkisi bulunamamıştır. Bu araştırmacılar mastır alaşımlardaki borürlerin tane sınırlarına doğru yönelirken alüminitlerin alüminyum tanelerinin ortalarında kaldığı gözlemlemişlerdir. (Murty ve ark., 2002). Mohanty ve Gruzleski adlı araştırmacılar borürlerin tane sınırlarına doğru itildiğini onaylamışlardır.

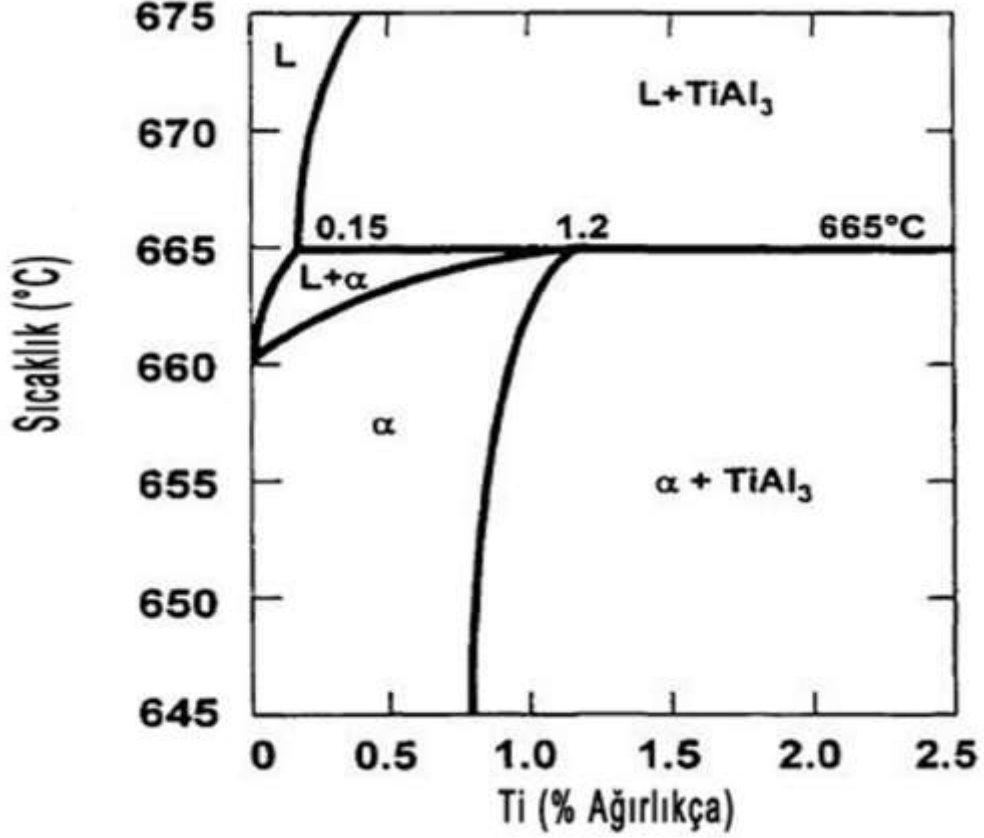
Son zamanlarda Al-B mastır alaşımlarıyla yapılan alüminyum tane inceltme çalışmalarında,  $AlB_2$ 'nin alüminyum için etkili bir çekirdekleştirici olduğunu göstermişlerdir. Aynı şekilde  $TiAl_3$  bileşiklerinin de alüminyum için etkili çekirdekleştirici oldukları bilinmektedir. Al-Ti mastır alaşımları alüminyum alaşımlarında ötektik üstü konsantrasyonlarda ilave edildiklerinde etkili bir tane inceltme gözlemlenmiştir (Murty ve ark., 2002).

#### 4.6.3.2. Faz Diyagramı / Peritektik Teorisi

Bir grup araştırmacı, daha önce Mondolfo ve Crossley tarafından ileri sürülen  $TiAl_3$  bileşiminin peritektik reaksiyon sonucunda alüminyumu çekirdekleştirdiği görüşünü desteklemişlerdir. Mondolfo ve Marcantonio adlı araştırmacılar,  $TiAl_3$ ,  $CrAl_7$ ,  $NiAl_3$ ,  $VAl_{10}$ ,  $ZrAl_3$  ve  $AlB_2$  gibi bazı alüminit bileşiklerinin alüminyum için iyi birer çekirdekleştirici olduğunu belirtmişlerdir.

Mondolfo ve Marcantonio bu alüminitlerin her biri için düşük veya sıfıra yakın değerlerde alt soğutmanın mümkün olduğunu ve böylece çekirdeklenmeler üzerinde oldukça düşük atomik yer değiştirmelerle en az bir yönelme ilişkisi olduğunu

gözlemlemişlerdir. Fakat  $\text{CrAl}_7$  bileşiğinde bu şekilde bir ilişki tespit edilememiştir. Bu durum Cibula ve Eborall adlı araştırmacıların  $\text{CrAl}_7$  bileşiğinin düşük bir çekirdekleştirici olduğu görüşüyle uyuşmaktadır. (Murty ve ark., 2002). Şekil 4.11.'de Al-Ti faz diyagramının alüminyum köşesi görülmektedir.



Şekil 4.11. Al-Ti faz diyagramının alüminyum tarafı (Sigworth, 1984).

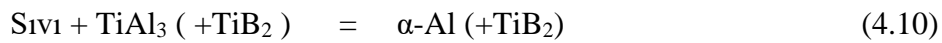
Peritektik teorisinin en büyük açmazlarından biri Şekil 4.11.'deki ikili Al-Ti faz diyagramından da görüleceği üzere sıvı alüminyumun peritektik sıcaklığında %0,15 Ti içermesi olduğudur. Fakat alüminyumun üçlü Al-Ti-B mastır alaşımlarıyla yapılan tane inceltme işlemlerinde, mastır alaşım formunda katılan Ti miktarı genellikle %0,01 Ti seviyesindedir. Bu miktar peritektik reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken miktardan oldukça düşüktür. Bu problemi önlemek amacıyla Delamore ve Smith adlı araştırmacılar,  $\text{TiAl}_3$  bileşiğinin, hiçbir peritektik reaksiyon olmasa dahi alüminyum ile heterojen çekirdekleşme sağlayabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Fakat çoğu araştırmacı peritektik reaksiyonun gerçekleşmesi için bor elementinin sıvı metal içerisinde peritektik bileşimde değişiklik yaparak titanyum oranını düşürmesi gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Marcantonio ve Mondolfo adlı

araştırmacılar 659,5°C sıcaklıkta %0,05 Ti, %0,01 B ve üçlü bir ötektik bileşiğin varlığını öne sürmüşlerdir. (Murty ve ark., 2002).



Ancak bu görüş diğer araştırmacılar tarafından destek görmemiş ve tane inceltme işlemleri nispeten daha düşük konsantrasyonlarda incelenmiştir. Diğer yandan Maxwell ve Hellawell Al–Ti–B üçlü sisteminde Eşitlik 4.10'daki gibi %0,0001 B ve %0,15 Ti elementlerinin sıvı bileşimde üçlü peritektik reaksiyon olduğunu ileri sürmüşlerdir.



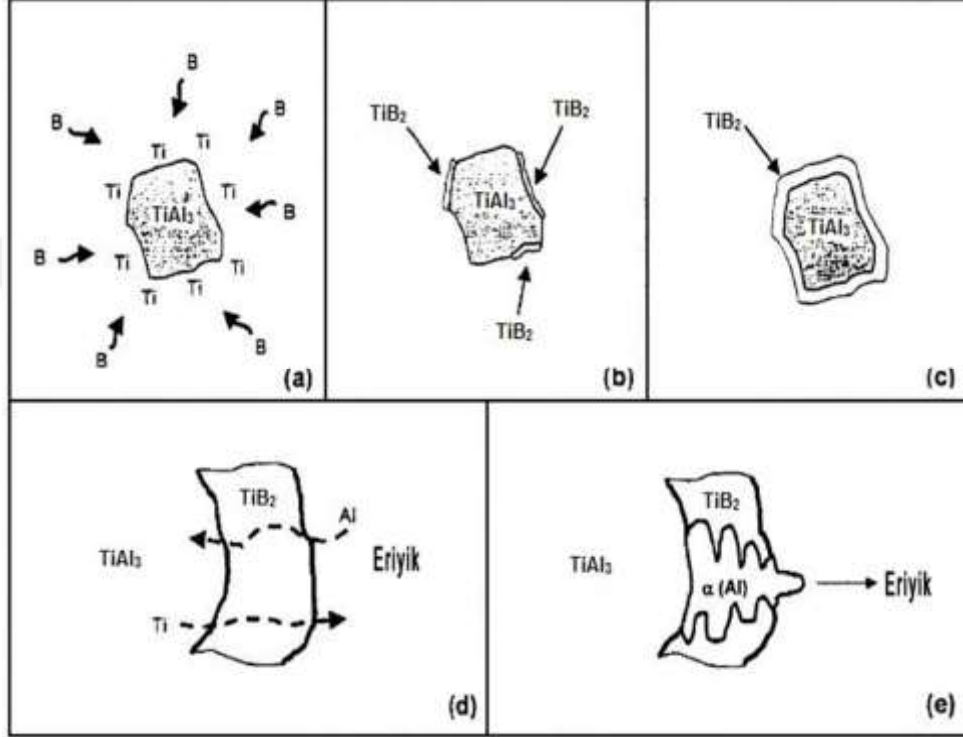
Bir grup araştırmacı üçlü Al–Ti–B faz diyagramındaki alüminyumca zengin köşesini incelemişler ve bor elementinin Al–Ti faz diyagramını pek fazla etkilemediğini kanıtlamışlardır. Yukarıda zikredilen araştırmalar, Al–Ti–B mastır alaşımındaki  $\text{TiAl}_3$  parçacıklarının alüminyum eriyiğe ilave edildikten sonra çözündüğü varsayımına dayanmaktadır. Eğer  $\text{TiAl}_3$  parçacıkları alüminyum eriyik içerisinde 665°C olan peritektik sıcaklığa erişinceye kadar çözünmemiş olsalardı bu durumda eriyiğin içinde yeterli sayıda  $\text{TiAl}_3$  parçacıkları mevcut olup peritektik reaksiyon gereğince tane inceltimi gerçekleşebilirdi.

Diğer yandan bor elementinin yüzey kısımlarında alüminitler ve boritler gibi ikili bileşikler oluşturarak  $\text{TiAl}_3$ 'ün çözünme oranını düşürdüğü ileri sürülmektedir. Bor elementinin Al–Ti ikili alaşımının tane inceltme sistemi üzerindeki etkisi net olarak bilinmemektedir. (Murty ve ark., 2002).

#### 4.6.3.3. Peritektik Hulk Teorisi

Hulk teorisi yakın zamanlarda Backerud ve Dong adlı araştırmacılar tarafından ileri sürülmüş, Vader ve arkadaşları tarafından da desteklenmiştir. Bu çekirdeklenme teorisi  $\text{TiAl}_3$  bileşiğinin  $\text{TiB}_2$ 'den daha iyi bir çekirdeklendirici olduğunu ileri sürerek, boritlerin alüminit bileşiklerinin çözünme oranını ne şekilde yavaşlattığını açıklamaya çalışır. Alüminitler, borit bileşiklerinin kabuğunun içerisinde peritektik bileşime yakın sıvı hücreden ayrılarak çözünürler.

Ancak bazı araştırmalar eriyik içerisinde bor elementine rağmen alüminit bileşiklerinin yüksek sıcaklık derecelerinde çözünmekte olduklarını göstermiştir. Bu teori şekil 4.12.'de şematik olarak verilmiştir. Bu peritektik hulk teorisine karşı Mayes ve arkadaşları, transmisyon elektron mikroskopuyla yaptıkları araştırmalarda  $TiAl_3$  parçacıklarının orta kısımlarında  $TiB_2$ 'nin varlığını saptamışlardır. (Murty ve ark., 2002). şekil 4.12.'de Peritektik hulk teorisinin safhaları şematik olarak gösterilmiştir.

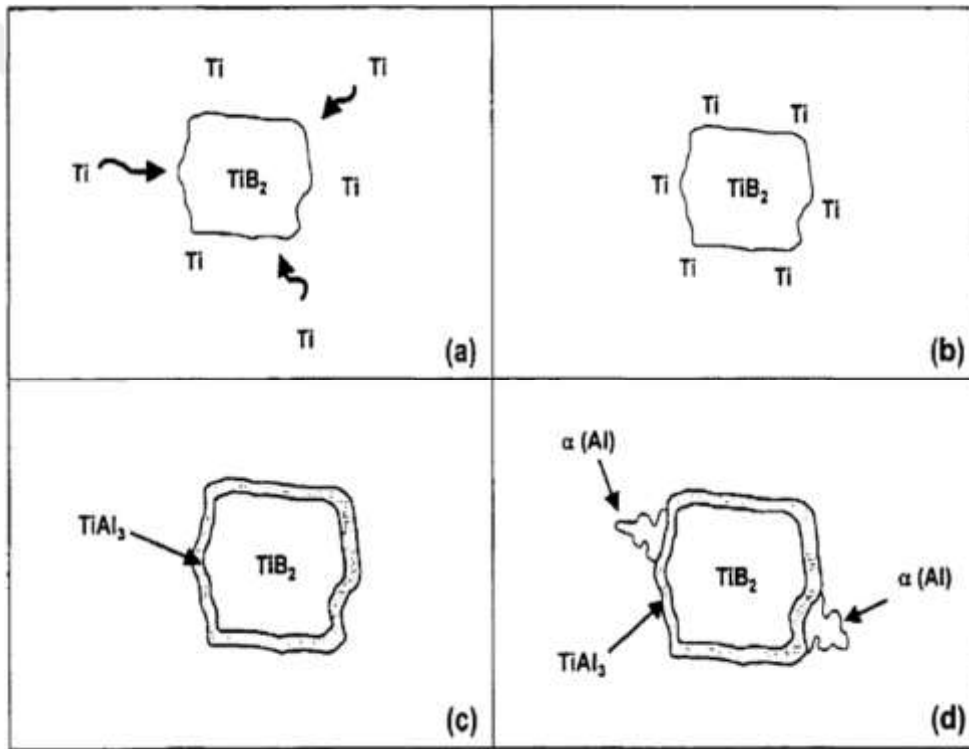


**şekil 4.12.** Peritektik hulk teorisini modeli (Ibarra, 1999); (a)  $TiAl_3$ 'ün kısmi çözünmesi ve  $TiAl_3$ 'e  $B$ 'nin difüzyonu, (b)  $TiB_2$ 'nin çözünebilme verimi artırılır, (c)  $TiAl_3$  üzerinde  $TiB_2$ 'nin koruyucu tabaka oluşturması, (d)  $Al$  ve  $Ti$ 'nin koruyucu tabaka boyunca eş zamanlı büyümesi, (e) ekirdek ve  $\alpha-Al$ 'ün büyümesi

Johnson ve arkadaşları alüminyum alaşımlarında tane inceltme veriminin az miktardaki sıvı metalin dökülerek katılaşması sırasında dahi değişmediğini ifade etmişlerdir. şayet peritektik hulk teorisini doğru kabul edilirse artan miktarlarda yapılan döküm işlemi sonunda tane inceltme verimi düşer. Bu durumda titanyum, eriyik hacminin dışına doğru difüzyona uğrayacağından peritektik reaksiyon gerçekleşmez.

#### 4.6.3.4. Hiper Çekirdeklenme Teorisi

Hiper çekirdeklenme teorisi Jones adlı araştırmacı tarafından öne sürülmüştür. Bu teoriye göre çok az miktardaki bor ve titanyum elementinin tane inceltme işlemi üzerinde büyük etkisi olduğundan dolayı bu isimle ifade edilmiştir. Bu teori, çözülmüş haldeki  $TiB_2$  bileşiğinin, titanyum atomlarının sıvı ara yüzeyindeki miktarına bağlı olarak ayrışma eğiliminde olduğunu belirtmektedir. Böylece  $TiAl_3$  bileşiğinin ince katmanı borür üzerinde çökerek peritektik reaksiyon sonucu  $\alpha$ -alüminyumlar çekirdeklenir. Şekil 4.13.'te hiper çekirdeklenme teorisi safhalar halinde şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.13.** Hiper çekirdeklenme teorisi modeli (Ibarra, 1999); (a) Eriyikte yoğun Ti miktarı (b)  $TiB_2$ -Sıvı ara yüzeyinde ayrışan Ti, (c)  $TiB_2$  üzerinde  $TiAl_3$  tabakasının oluşumu, (d) Peritektik reaksiyonla  $\alpha$ -Al çekirdeklenmesi

Bu teoriyle alakalı asıl problem, Jones adlı araştırmacının iddia ettiği üzere test edilmesi zor bir mekanizma için deneysel kanıt bulunmamasıdır. Sıvıda bulunan elementlerin ara yüzeyde ayrıştıkları doğrudur fakat bu durum çekirdeklenmedeki önemli değişiklikleri açıklayamamaktadır.  $TiB_2$  ilavesinin aktifleşme ve kimyasal potansiyelde değişikliğe neden olabileceğini iddia edilmektedir. Fakat bu iddia termodinamik açıdan geçersiz gözükmektedir. (Sigworth, 1996).

#### 4.6.3.5. Çift Çekirdeklenme Teorisi

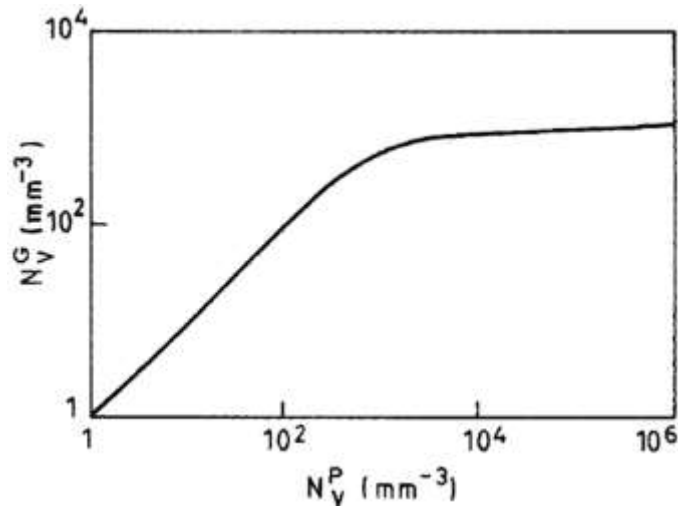
Bu teori ilk defa Mohanty tarafından ileri sürülmüş daha sonraları Schumacher, Greer ve arkadaşları tarafından desteklenmiştir. Buna göre Mohanty ve arkadaşları alüminyum eriyik içerisinde direk olarak ilave edilen farklı titanyum oranlarında  $TiB_2$  parçacıklarının tane inceltmedeki etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sıvı alüminyum içerisinde titanyum miktarının eksik olduğu durumlarda,  $TiB_2$  bileşikleri çekirdeklenme yerleri olarak hareket etmeyerek tane sınırlarına doğru itildiklerini belirtmişlerdir. (Murty ve ark., 2002).

Schumacher ve Greer Al–Ti–B üçlü mastır alaşımına metalik cam ( $Al_{85}Ni_5Y_8Co_2$ ) eklemişlerdir. Bu durumda boritlerin  $TiAl_3$  tabakasıyla ve sonrasında alüminyum ile çevrelendiklerini gözlemlemişlerdir. Bu bulguları Mohanty'nin teorisini desteklemiştir. Shumacher ve arkadaşları ise  $TiB_2$  yüzeyleri üzerindeki çekirdeklenme durumlarını direk olarak gözlemlemişlerdir. (Murty ve ark., 2002).

#### 4.6.3.6. Çözünen Teorisi

Bu teoriye göre Johnson ve arkadaşları, hem çekirdekleştiricilerin hem de ayrışan çözünen maddelerin, tane inceltmeyi etkilediğini ileri sürmüşlerdir. Burada ayrışma derecesi tane inceltici faktör olan (GRF) cinsinden ölçülür. Çözünen maddelerin tane inceltici faktör şeklinde ele alınması çok öncelere dayanır. Titanyumun tane inceltmedeki önemi onun bu ayrışmaya karşı kuvvetli eğilimine dayanmaktadır. Şekil 4.14.'te birim hacimdeki parçacık sayısı ( $N_V^P$ ) ile birim hacimdeki tane sayısının ( $N_V^S$ ) değişimi görülmektedir.





**Şekil 4.14.** Birim hacimdeki parçacık sayısı ( $N_V^P$ ) ile birim hacimdeki tanelerin sayısının ( $N_V^G$ ) değişimi (Murty ve ark., 2002)

Maxwell ve Hellawell, birim hacimdeki tane adedi arttıkça ( $N_V^G$ ), birim hacimdeki parçacıklar da ( $N_V^P$ ) artmaktadır. Fakat bu artış kritik bir değere kadar gerçekleşir. Şekil 4.14.'te görüldüğü üzere bu kritik değerden sonra doyuma ulaşmaktadır. Bu da ( $N_V^P$ ) kritik değerinden sonra, ilave edilen partiküllerin etkili bir çekirdekleşme yeri teşkil etmeyeceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle ( $N_V^P$ ) kritik değeri, büyük oranda tane inceltme katsayısına dayanmaktadır. (Murty ve ark., 2002).

Titanyum, zirkonyum ve krom elementlerinin peritektik bileşimlerdeki tane inceltme katsayıları sırasıyla 31, 5 ve 0,5 değerleridir. Bu da açıkça göstermektedir ki titanyum elementi, zirkonyum ve krom elementlerinden daha iyi bir tane incelticidir. %0,01 Ti ilave edildiğinde tane inceltme katsayısı 2,1 değerinde iken, %0,001 bor ilave edildiğinde tane inceltme katsayısı 0,02 değerinde olmaktadır. Bu da bor elementinin titanyum kadar etkili tane inceltici olmadığını göstermektedir.

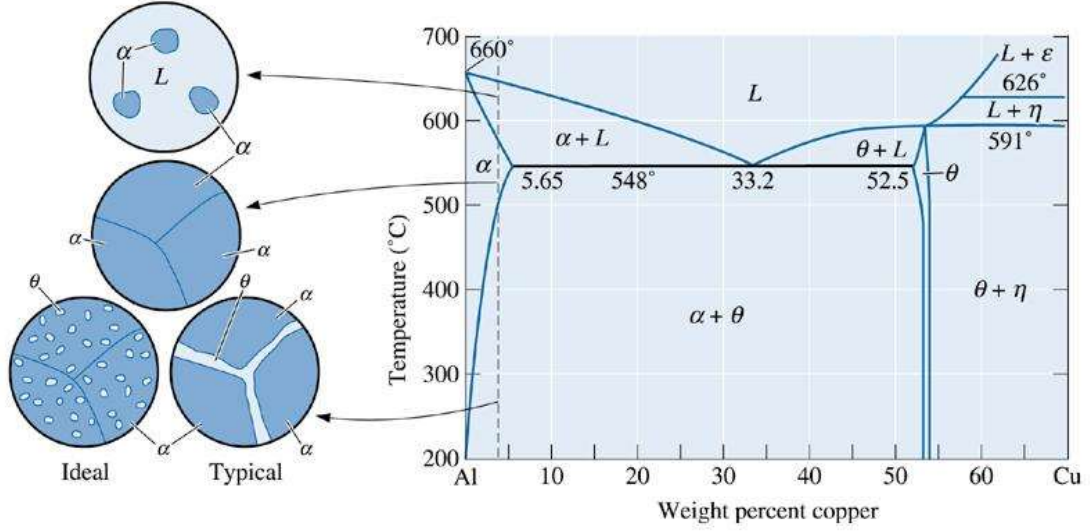
Alaşımında birçok element bulunması halinde, tane inceltme katsayısı elementlerin her birisinin tane inceltme katsayıları tek tek toplanarak belirlenir. Bu da çözünenlerle üçlü veya daha fazla sayıdaki bileşenlerin etkileşimlerinin göz ardı edilerek nazarı itibara alınmadığı anlamına gelmektedir. (Murty ve ark., 2002).

Johnson, Hellawell ve Maxwell gibi araştırmacılar, eriyiğin içinde bir miktar titanyum elementi bulunduğunda  $TiB_2$  bileşiğinin alüminyum kristalleşmesi açısından iyi bir alt tabaka olması için yeterli oranda aşırı soğutma sağlayacağını iddia etmişlerdir. Dolayısıyla  $TiB_2$ 'nin iyi bir çekirdekleyici olduğunu savunmuşlardır. (Murty ve ark., 2002).

## 5. T6 ISIL İŞLEMİ

### 5.1. Al-%5Cu Faz Denge Diyagramları

Şekil 5.1.'de Al-%5Cu faz diyagramının alüminyum köşesinde Al-%5Cu alaşımı için mikro yapı gelişiminin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 5.1. Al-%5Cu alaşımı için faz denge diyagramının Al köşesi

### 5.2. Alüminyum Alaşımları İçin Isıl İşlem Göstergeleri

Alüminyum alaşımlarına uygulanan mukavemetlendirme derecesi, bu alaşımların ısıl işlem uygulanabilir veya pekleştirilebilir olmasına göre "T" veya "H" ile gösterilen temper tanımlaması ile belirlenmektedir. Çizelge 5.1.'de alüminyum ısıl işlemlerinde kullanılan temper işaretleri listelenmiştir. Diğer tanımlamalar ise; (O) alaşımın tavlandığını, (W) çözündürme uygulandığını ve (F) sembolü ise üretildiği şekilde kullanıldığını ifade etmektedir.

"T" ve "H" sembollerini takip eden rakamlar pekleşme miktarını, ısıl işlem tipini veya bu alaşımın özel üretim işlem durumlarını göstermektedir (Güler, 2003).

Çizelge 5.1. Alüminyum Alaşımları İçin Temper Seri Numaralarının Tanımları (Kvande, 1999)

Temper No	Açıklama
<b>F</b>	İmal edildiği şekilde
<b>O</b>	Tavllanmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
<b>H</b>	Soğuk şekillendirilmiş
<b>H1X</b>	Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına işaret eder)
<b>H12</b>	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
<b>H14</b>	Soğuk şekillendirme, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
<b>H16</b>	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
<b>H18</b>	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
<b>H19</b>	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile çekme dayanımı 2000 psi artar
<b>H2X</b>	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavllanmış
<b>H3X</b>	Yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
<b>W</b>	Çözelti ısı işlemi görmüş
<b>T</b>	Yaşlandırılmış
<b>T1</b>	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
<b>T2</b>	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
<b>T3</b>	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
<b>T4</b>	Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
<b>T5</b>	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
<b>T6</b>	Çözelti ısı işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
<b>T7</b>	Çözelti ısı işlemi görmüş ve kararlaştırılmış
<b>T8</b>	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
<b>T9</b>	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
<b>T10</b>	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

Dökme veya dövme alüminyum alaşımlarının ısı işlem notasyonları O, F, H, T ve W gibi ısı işlem sembolleriyle ifade edilir.

**O:** Yumuşatma tavlama yapılmış demektir. Tavllanmış ve yeniden kristalleştirilmiş demektir. Şekillendirilen alüminyum alaşımlarının en yumuşak olanıdır.

**F:** Üretildiği gibi demektir. Sıcaklık şartları kontrol edilmeksizin, sıcak şekil verme, soğuk şekil verme veya dökümle üretilmiş malzeme demektir. Bu notasyon malzemenin mukavemet veya sertliğini değiştirmek amacıyla hiçbir ilave işlem yapılmamış ürün demektir. Buna göre şekillendirilmiş olan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri için hiçbir garanti yoktur. Örneğin 43-F işareti döküm hali için kullanılmaktadır.

**H:** Çoğunlukla sac ve levha gibi yassı ürünlerde kullanılan bir notasyondur. Soğuk biçimlendirme (Rekristalizasyon sıcaklığının altında yapılan plastik şekillendirme) sonucu ve kısmi bir yumuşama elde etmek üzere ilave ısı işleminin yapıp

yapılmamasına rağmen biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarında elde edilen mukavemet ve sertlik artışını ifade eder. (H) notasyonundan sonra ekseriya iki veya daha fazla rakam vardır. İlk rakam, esas işlemleri ifade eder. Daha sonraki rakamlar, plastik şekillendirme sınırları içindeki nihai fiziksel özelliklerini belirtir. Bu rakamların ifade ettiği özellikler aşağıda belirtilmiştir.

**H1:** Plastik şekillendirme sınırları içinde sadece şekil verilmiştir. İkinci rakam, yapılan soğuk işlemi ifade etmektedir. Şöyle ki; 8 rakamı erişilebilen en sert hali ifade eder. Böylece (H18) bu sonucu gösterir. En sert ile yumuşak arasındaki orta sertlik (H14) şeklinde ifade edilir. Aynı şekilde dörtte bir sertlik ise (H12) şeklinde belirtilir. Üçüncü rakam, ekseriya ayrı özellikleri belirtmek için kullanılır. Şöyle ki: (H141), (H14) sağladığı aynı minimum özellikleri vermekle beraber maksimum değerler standart değerlere daha çok yakındır.

Üçüncü rakam, (H14)'den daha farklı değerleri ifade etmekle beraber (H13) veya (H15)'in yerine kaim olacak ölçüde değildir. Çok sert özellikler, üçüncü rakam olsun veya olmasın, ikinci rakam olarak (9) kullanıldığı zamanı belirtilirler. (H112) işareti "kontrollü" olarak, F-ısıtıl işlem halinin garanti edilmiş mekanik özelliklerini gösterir.

**H2:** Plastik şekillendirmeden sonra kısmi tav halini ifade eder. Alaşımın plastik şekil alma sonucu belirli bir mukavemet ve sertlik sağladıktan sonra kısmen tav yapılarak bu değerlerin istenen sınırlar içine indirilmesi demektir. Bu durum, ilk rakamın 2 olarak yazılması ile belirtilir. İstenen kalıcı mukavemet ve sertlik (H1) de olduğu gibi ikinci rakam ile belirtilir. Örneğin: H28 tam sert, H24 yarı sertini ifade eder. Oda sıcaklığında yaşlanma yumuşaması sağlayan alaşımların H2 hali H3'ün fiziksel özelliğine eşit olmaktadır. Diğer alaşımlar bahis konusu olduğunda, H2 hali yaklaşık olarak H1'in fiziksel özelliklerine eşit olmakla beraber, uzama kat sayısı biraz daha fazladır.

**H3:** Plastik şekillendirme ve bilahare stabilizasyon hali. Magnezyum ihtiva eden alüminyum alaşımları düşük sıcaklıklarda ısıtılmak suretiyle stabilize edilerek mukavemetleri biraz azaltılırken onların şekil alma özellikleri artırılmaktadır. Bu işlem yapılmaz ise, bahis konusu değişiklik oda sıcaklığında çok uzun sürede meydana gelir. Bu işlem (H)'den sonraki üçüncü rakam ile ifade edilmektedir. Plastik şekillendirme işlemi de (H)'den sonraki iki veya ilk rakam ile ifade edilir.

**W:** Çözeltiye alma ısıl işlemi yapılmış. Solüsyona alma ısıl işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı ifade eder. Bu hal doğal yaşlanmadan ötürü, yaşlanma süresinin verilmesi ile belirtilmiş olur. Örneğin 2024 W (1/2 saat), 7075 W (2 ay) vb.

**I:** F,O,H halleri dışında, yapıda stabilizasyon sağlanması amacıyla uygulanan ısıl işlemleri belirtmektedir. Bu harf plastik şekillendirme yapılsın veya yapılmasın yapının kararlı hale gelmesi için uygulanacak ısıl işlemi ifade eder.

**T:** T notasyonu, ısıl işlem yapılarak elde edilen temperleri ifade eder. Isıl işlemlerinin değişik türleri, aşağıdaki harf ve rakam göstergeleriyle ifade edilmektedir.

**TO:** temperi dışında kararlı bir yapı elde etmek için uygulanan ısıl işlemi ifade eder. Asıl amaç ürüne yüksek mukavemet kazandırmaktır. Bazı durumlarda ısıl işleme ve tempere göre soğuk işlem de yapılır. Kararlı dengeli bir yapı elde edilir. T harfinden sonra en az bir rakam gelir.

**T1:** Sıcak işlemden sonra soğutulur ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve doğal yaşlanmaya bırakılmış.

**T2:** Yüksek sıcaklıklarda yapılan şekillendirme işleminden sonra soğutulur, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

**T3:** Solüsyona alma ısıl işlemi uygulanır, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

**T4:** Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlanmaya bırakılmış.

**T5:** Sıcak işlemden sonra soğutulur ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir.

**T6:** Solüsyona alma ısıl işleminden geçirilir ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir.

**T7:** Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlandırılmış.

**T8:** Solüsyona alma ısıl işleminden geçirilir, soğuk işlemden geçirilir ve yapay yaşlanma yapılır.

**T9:** Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem yapılmış.

**T10:** Yüksek sıcaklıklarda yapılan şekillendirme işleminin ardından soğuk işlem yapılmış ve yapay yaşlandırılmış.

**T42 ve T62:** Başlangıçta O veya F temperinde olup da test amacıyla yapılan ya da kullanıcı tarafından yapılan ısıl işlemi belirtmek için kullanılır. T42 doğal, T62 yapay yaşlanmış demektir.

Solüsyona alma ısıl işlemi: Alüminyum alaşımı bünyesindeki alaşım elemanlarını katı çözeltiye almak için malzemenin 520°C veya üzerinde belirli bir süre tutulup ani olarak soğutulması. Bazı alüminyum alaşımlarında (Örneğin 6060 / 6063 /

AlMgSi0.5) ekstrüzyon gibi sıcak bir prosesten sonra malzemenin hava ya da su ile ani soğutulması, solüsyona alma ısıl işlemi sonucunu verir.

**Doğal yaşlanma:** Alüminyum alaşımının oda sıcaklığında bekletilmesiyle, katı çözeltili içindeki alaşım elemanlarının katı çözeltiden ayrılıp çökerek "çökeltme sertleşmesi" mekanizması ile malzemenin sertliğinin artması.

**Yapay yaşlanma:** Doğal yaşlandırma ile elde edilemeyecek kadar yüksek sertlik değerlerinin bir ısıl işlem fırınında belirli sıcaklık ve sürede yapılması. (Örnek: 6060 / 6063 / AlMgSi0.5 alaşımı).

### 5.3. T6 Yaşlandırma Isıl İşlemi

Alüminyum alaşımları ısıl işlemle sertleşebilen veya sertleştirilemeyen olmak üzere iki gruba ayrılır. Isıl işlemle sertleştirilemeyen alüminyum alaşımları soğuk şekillendirilme işlemleriyle sertleştirilirler. Sertleşebilen alüminyum alaşımların, belirli sıcaklık değerlerinde belli sürelerde bekletilmesiyle mukavemet ve sertlikleri belli oranda yükseltilebilir. Bu bekletme işlemine yaşlandırma ve gerçekleşen bu işleme de ayrışma sertleşmesi veya çökeltme sertleşmesi denir. Yaşlandırma ısıl işlemi, belirli bir sıcaklıkta yapılırsa yapay yaşlandırma, normal oda sıcaklığında yapılırsa doğal yaşlandırma adını alır. Bir alüminyum alaşımının yaşlandırma ısıl işlemi 3 kademede gerçekleştirilir.

1. Önceden belirlenen bir sıcaklığa kadar tavlama ve bu sıcaklıkta bekletme

2. Düşük bir sıcaklığa hızlıca su verme.

3. Su verme işleminden sonra yaşlandırma veya çökeltme sertleşmesi için bekletme

**Tavlama:** Mekanik yollarla işlem görmüş olan alüminyum alaşımlarına bu işlemlerden sonra tavlama işlemi yapmak gerekir. Tavlama, soğuk şekil değiştirme sonucunda sertleşmiş olan malzemenin sertliğini azaltmak veya malzemeyi bir derece yumuşatmak amacıyla yapılır.

Tavlama işlemi yaşlanma sertleşmesinin, sertleşme etkilerini ortadan kaldırır. Metale soğuk işleme uygulanması da onun sertliğini ve çekme mukavemetini yükseltirken diğer yandan sünekliğini azaltır. Metalin soğuk işlemlerinin devam edebilmesi için tavlama işlemi uygulayarak metal yeniden ısıtılır. Isıl işlemde alaşımın tavlama sıcaklığı ve süresi önemlidir. Yeniden kristalleşme işlemi uygulanan alaşım yeterli sıcaklıkta yeterli sürede bekletilmezse yeniden teşekkül eden kristaller eski

özelliklerini tamamıyla değiştirmezler. Bunu sağlamak için yeterli sıcaklık ve zaman süresinde malzemeyi bekletmek gerekir. Tavlanan alaşımın ince ve kenar kısımlarının hızlı tavlama ile bozulmasını önlemek için sıcaklığın yavaş yavaş artırılması gerekir. (Anonim, 01/2020).

### 5.3.1. Solüsyona Alma İşlemi

Solüsyona alma işleminin de aşamaları vardır. Alaşım önce seçilen bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu işlemin maksadı alüminyum alaşımının sıcaklığını yükselterek alaşım içerisinde düşük sıcaklıklarda az eriyen, yüksek sıcaklıklarda fazla eriyebilen alaşım elemanlarının erirliğini sağlamaktır. Eriyebilen elemanlar alüminyum alaşım içerisinde katı eriyik halinde kalmalıdır. Çok düşük sıcaklıklarda fazla bir mukavemet elde edilemeyeceği gibi yüksek sıcaklıklarda da eriyebilen elemanların ergime tehlikesi vardır.

Sıcaklık değeri gereğinden fazla yüksek seçilirse su verme sırasında gerilmeler çoğalır. Bu sebepten dolayı mevcut alaşım elemanlarının en düşük ergime sıcaklığındaki elementin, ergime sıcaklığının daha aşağısında bir derece seçilmelidir. Isıtma hızı çok önem arz eder. Genellikle orta seviyede bir ısıtma tavsiye edilir. Őayet ısıtma yavaş olursa, eriyebilen elemanların difüzyonu fazla olur. Yavaş ısıtmada taneler büyüme meyli gösterir. Őayet malzeme soğuk deformasyona tabi tutulmuşsa, tane büyümesine engel olmak için hızlı ısıtma yapılmalıdır. Malzemede kritik değerde soğuk deformasyon mevcut değilse tane büyüme tehlikesi yoktur.

Tavlama sıcaklığına ulaşıldığında bu sıcaklıkta yeterli süre bekletilmelidir. Bekletme süresi, malzemenin cinsine, tavlama şekline ve sıcaklığa bağlı olarak değişir. Bu sürenin gereğinden fazla olması, difüzyonun artmasına, tane büyümesine ve renk değişikliğine sebep olur. Bekletme süresi, malzemenin en soğuk kısmının gerekli minimum sıcaklığa ulaşmasına yeterli süre olmalıdır. Bekletme süresi kalın parçalar için kesitteki kalınlığın her 1,5 cm değerine karşılık 1 saat kabul edilir. Katı eriyik çözünme işlemi tamamlandığında alaşımın yapısı, homojen dağılıma sahip ve aşırı doymuş hale gelir.

Su verme işlemi, alaşım içerisinde eriyebilen elemanların katı eriyik yapılarından sonra bunların yeniden çökelmelerine mani olmak veya geciktirmek için malzemeye su vermek gerekir. Su vermede üç farklı yöntem vardır. Birinci yöntem soğuk suda su vermedir. İkinci yöntem sıcak suda su verme işlemidir. Büyük ve kalın

kesitli döküm parçalara 75-90°C sıcaklıkta su verilir. Bu su verme yönteminde distorsiyon en aza indirilmiş olur. Çatlama tehlikesi önlenmiş olur. Üçüncü su verme yöntemi püskürterek su vermedir. Yüksek hızla su püskürterek su verme, levhalara ve geniş yüzeyli parçalara uygulanır. Bu yöntemle su verme distorsiyonu en aza indirir ve su vermeden kaynaklanan çatlama önler.

### 5.3.2. Solüsyona Alma ve Su Verme Sırasında Dikkat Edilecek Noktalar

Bekletme süresi ve su verme arasında sıkı bir ilişki vardır. Malzemeyi fırından çıkarıp su verilmesine kadar geçen süre mümkün olduğunca kısa seviyede olmalıdır. Levha halindeki alaşımlar için bu süre 10 saniyeyi geçmemelidir. Fakat kesit büyüdüğü durumlarda bu süre uzatılabilir. Malzemenin su vermeden önce soğutmaya bırakılması katı eriyiklerin çökmesine neden olabilir. Bu çökme malzemenin tane sınırlarında ve kayma düzlemlerinde teşekkül ettiğinden malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti azalır. Çekme ve akma mukavemetinin düşük olmasının bazı sebepleri vardır. Bunları, tavlama sıcaklığının gereken değerden düşük olması, ısıl işlem süresinin kısa olması, fırından su verme banyosuna geç nakletme ve aşırı ısıtma olarak sıralayabiliriz.

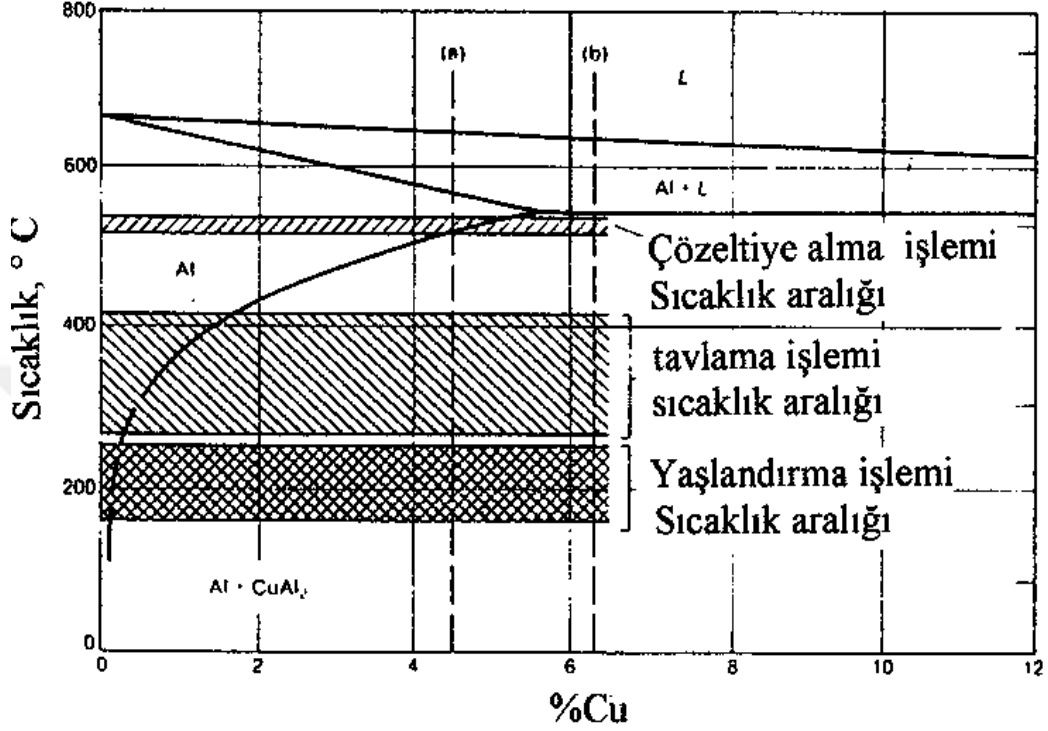
Alüminyum alaşımlarının yaşlandırma işlemi için genel koşul; aşırı doymuş haldeki katı fazdan yaşlanma işlemiyle, yapı içerisinde çok ince çökelti fazlarının dağılımıdır. Çökelti fazları hem doğal hem de yapay olarak gerçekleşebilir. Alüminyum alaşımlarına, yapay yaşlandırma yoluyla daha yüksek mukavemet kazandırılabilir. Yaşlandırma ısıl işlemindeki başlıca parametreler; önce çözeltiye alma, su verme ve takibinde doğal veya yapay çökeltme işlemidir.

Alüminyum alaşımları için çözeltiye alma sıcaklığı 465-565°C arasındadır. Çözeltiye almada  $Al_2Cu$  fazının tamamen çözünebilmesi amacıyla ısıtma yavaş yapılmalıdır. Çözeltiye alma sıcaklığı düşük tutulduğunda ikinci faz tamamen çözünemez sonuç olarak alaşım yumuşayacaktır. Kalın şekilli parçaların çözeltiye alma süresileri için her 25 mm kalınlığa bir saat süre yeterli olacaktır. (Geçkinli, 2002). Şekil 5.2.'de Al-%5Cu denge diyagramında, çözeltiye alma, tavlama ve çökeltme sıcaklık aralıkları görülmektedir. Bu diyagramdan da görüleceği üzere çözeltiye alma sıcaklığı, 548°C olan ötektik ergime sıcaklığının altındadır. (Geçkinli, 2002; Yılmaz 2002)

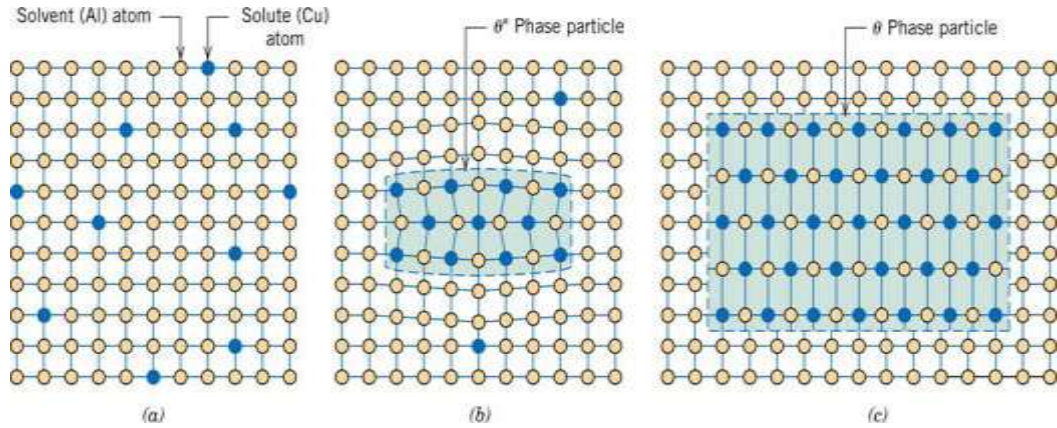
Çökeltme işleminin gerçekleşmesinden sonra, tanelerin içerisinde yer alan ikinci faz tanecikleri matristen daha sert olduklarından deformasyon sırasında dislokasyon hareketlerini kilitlerler. Bu sebeple çökeltilerin etrafında dislokasyon halkaları teşekkül



ederek dislokasyon yoğunluğu artmaktadır. Dolayısıyla malzemede mukavemet ve sertliğin artışının başlıca nedeni budur. (Geçkinli, 2002; Tekin, 1984; Tayanç, 1998). Şekil 5.3.'te yaşlanma olayının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.2. Al-%5Cu denge diyagramda, çözeltiye alma tavlama ve çökeltme işleminin yapıldığı sıcaklık aralıkları belirtilmektedir. (Geçkinli, 2002; Yılmaz, 2002)



Şekil 5.3. (a) Aşırı doymuş  $\alpha$  katı fazı (b)  $\theta'$  çökelti fazına dönüşüm (c)  $\alpha$  matrisi içerisinde  $\beta$  fazı. Yaşlandırma sertleşmesi için uygun bileşimde bir alaşım tek fazlı bir yapı elde etmek amacıyla ( $\alpha$ ) T1 sıcaklığına kadar ısıtılır ve alaşımdaki bütün fazların tek faz içerisinde çözünmesine kadar bekletilir. Bu işleme çözündürme veya çözeltiye alma işlemi denir. Çözündürme işleminden sonra alaşım hızla soğutulur (su verme) aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltisi elde edilir. Ancak aşırı doymuşluk kararsız bir yapıdır, kararlı hale getirebilmek için yaşlandırma işlemi uygulanır.

## 6. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ming-Yu Xie ve ark., Al-%5Cu alüminyum bakır alaşımının tane inceltilmesi üzerinde çalışmışlardır. AlTiB tane inceltici mastır alaşımından %0.2, %0.4, %0.6 ve %0.8 gibi dört farklı oranlarda girmişlerdir. Çözeltiye alma ısıl işlemini 535<sup>0</sup>C'de 12 saat ve 30<sup>0</sup>C'deki suda su verilmiş takibinde 175<sup>0</sup>C'de 18 saat bekletilerek yapay yaşlandırma yapmışlardır. Sonuç olarak %0.6 Al-5Ti-1B oranında mastır alaşımı girildiğinde, ortalama tane boyutu 70µm, çekme dayanımını 435 MPa ve yüzde uzama değerini de %11 olarak bulmuşlardır. (Xie, Ao ve Wang, 2014). 2014 yılında yapılan bu çalışmada sadece Al-5Ti-1B mastır alaşımı kullanılmıştır. Benim çalışmamda ise tane inceltici girilmemiş Al-%5Cu alaşımı ile üç farklı tane inceltici olan AlSr10, Al-3Ti-1B ve Al-5Ti-1B mastır alaşımalar girilmiştir.

Sigwort ve Kuhn (2007), Al-Si, Al-Si-Cu, Al-%5Cu, Al-Mg ve Al-Zn-Mg gibi alüminyum alaşımları üzerinde Al-Ti-B tane inceltici mastır alaşımının etkileri üzerinde çalışmışlardır. Tane inceltici olarak girilen Al-5Ti-1B ve Al-3Ti-1B mastır alaşımları girildiğinde, en iyi tane inceltme sonuçlarını 10-20 ppm B girildiğinde elde etmişlerdir. Sigwort ve arkadaşının yapmış olduğu bu çalışmada A356 Al-Si alaşımına üç farklı mastır alaşım girilmiş ve tane inceltmede hangi aşıluyıcının daha etkili olduğu kıyaslanmıştır. Buna göre; Al-5Ti-1B, Al-5Ti ve Al-4B mastır alaşımlarını kullanarak, Al-Si alaşımları için Al-4B aşıluyıcının diğerlerine göre tane inceltme etkisinin daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Fakat yapılan literatür taramasında Al-%5Cu alaşımları için böyle bir çalışmaya rastlanamamıştır.

Bu çalışmadaki sonuç verilerine göre %0.06Ti ve %0.06B oranlarında girilen tane incelticilerle, Al-5Ti-1B için 900 µm, Al-5Ti için 500 µm ve Al-4B için 200 µm ortalama tane boyutu değerleri elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada Al-Si sisteminde titanyum elementinin kolay çözünen AlTi<sub>3</sub> bileşiği ile çözünmeyen kararlı TiB<sub>2</sub> titanyum borür bileşiklerinin tane inceltme işleminde çekirdekçik olarak davrandıklarını belirtmişlerdir. Titanyumun tane inceltmede en etkin oran olarak %0.10 Ti değeri olduğunu göstermişlerdir. Bu değerden daha fazla titanyum ilave edilmesinin tane inceltmede etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir.

Çolak ve ark., (2009), titanyum ve bor elementlerinin tane inceltici olarak %0.01 oranında Etial-160 alüminyum alaşımına ilave edilmesiyle önemli derecede tane inceltme etkisi olduğunu göstermişlerdir. Etial-160 alaşımına tane inceltme uygulandığında, gözenekli yapının azaldığını, besleme ve sızdırmazlık özelliklerinin

arttığını, düşük segregasyon dağılımı meydana geldiğini belirtmişlerdir. Tane inceltmede titanyum ve bor elementlerinin birlikte kullanılmasıyla oluşan  $TiB_2$  kararlı titanyum borür bileşiğinin iyi bir heterojen çekirdekleyici olduğu ve  $TiB_2$  partiküllerinin sıvı alüminyum alaşımı içerisinde çözünmeden kaldığını belirtmişlerdir.

Bu makalede Etial-160 alüminyum alaşımına ilave edilen tane incelticilerin, döküm işlemi esnasında, tane inceltmedeki etkisinin zamanla azaldığını göstermek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Al-5Ti-1B tane inceltici ilavesinin 25 dakikaya kadar etkin olduğunu, bu dakikadan sonraki sürelerde tane boyutunun arttığını grafiklerle göstermişlerdir.

Tane inceltme işleminde en az %0.15 Ti girilmesi gerektiğini, bu değer in altındaki oranlarda titanyumun tane inceltmede yetersiz olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı zamanda %0.35 Ti değerinin de üst değer olduğunu bunun üzerindeki titanyumun tane inceltmede etkisinin fazla olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada Al-Ti faz denge diyagramında görüldüğü üzere alüminyum içerisine titanyum ilavesi, alüminyumun ergime derecesini  $660^{\circ}C$ 'den  $665^{\circ}C$ 'ye yükseltmektedir. Isıl işlem sırasında çözeltiye alma sıcaklığının tespitinde bu noktanın dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bunn ve ark., (1999), Ticari safiyetteki alüminyum alaşımında Al-5Ti-1B mastır alaşımı tane inceltici olarak kullanıldığında eğer yapıda zirkonyum elementi mevcutsa, tane inceltme etkisini ortadan kaldırdığını göstermişlerdir. Zirkonyum elementi hem  $TiB_2$  hem  $Al_3Ti$  bileşikleriyle etkileşime girerek bu etkiyi yaptığını göstermişlerdir. Al-Ti-B tane inceltici alaşım, sıvı maden içine  $720^{\circ}C$ ,  $760^{\circ}C$  ve  $800^{\circ}C$  sıcaklıkta 6 saat süreyle bekletilmiş, karıştırılıp dökülerek test edilmiştir. Bu çalışmada %0.05 Zr ilavesinden sonra  $800^{\circ}C$  sıcaklıkta 6 saat bekledikten sonra ortalama tane boyutunun  $225 \mu m$ 'den dramatik olarak  $1800 \mu m$ 'ye yükselerek tanelerin kabalaştığını göstermişlerdir.

Fan ve ark., (2015), Alüminyum alaşımında %0.2 Al-5Ti-1B mastır alaşımının tane inceltici olarak kullanılmasıyla  $TiB_2$  bileşiğinin, iki boyutlu  $Al_3Ti$  bileşiğini kendisine bağlayarak çekirdekçik etkisini artırdığını göstermişlerdir. Tane incelticilerin, ergimiş sıvı metale ilave edilmesiyle mastır alaşımdan çözünerek serbest hale gelen titanyum elementinin, alaşımın yapısının kolonsal dentritik yapıdan, eş eksenli tane yapısına dönüşümünü artırdığını göstermişlerdir. Ayrıca  $Al_3Ti$  bileşiğinin, yoğun Al-Ti çözeltilerinde kararlı, seyreltik çözeltilerde ise kararsız olduğunu belirtmişlerdir.

Çolak ve ark., (2009), Etial-160 alüminyum alaşımına ilave edilen Al-5Ti-1B mastır alaşımı tane incelticinin, bekleme zamanına göre etkisini incelemişler ve tane inceltici ilave edildikten 25 dakika sonra ortalama tane boyutu  $560 \mu\text{m}$ 'den  $195 \mu\text{m}$ 'ye küçüldüğünü göstermişlerdir. 60 dakika sonra alınan numuneden yapılan ölçümlerde tane boyutunun  $300 \mu\text{m}$  seviyesine çıktığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak, tane inceltici ilavesiyle alaşım içerisinde oluşan  $\text{TiB}_2$  ve  $\text{TiAl}_3$  gibi intermetalik bileşiklerin zamanla çözünmeye başlaması ve bunların birbirleriyle birleşerek büyümesi olduğunu ifade etmişlerdir.

Kashyap ve Chandrashekar, (2001), alüminyum alaşımlarında tane inceltme mekanizmaları ve bunların etkileri üzerinde çalışmışlardır. Faz diyagramı teorisi, peritektik hulk teorisi, hiper çekirdeklenme teorisi ve iki katlı çekirdeklenme teorisi bunlardan bazılarıdır. Alüminyum alaşımlarında tane inceltme mekanizmasının, heterojen çekirdeklenme ve takibinde çekirdekçiğin büyümesi olarak ifade etmişlerdir. Tane inceltme mekanizmasında çekirdekçikle birlikte çözünen etkisinin de önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Sun ve Apelian, (2014), A206 alüminyum döküm alaşımlarında sürtünme karıştırma yöntemiyle tane boyutu inceltmede yüksek performans elde etmişlerdir. Bu yöntemle kısmi ve bölgesel olarak alüminyum matrisin yüzey bölgesinde sürtünme etkisiyle  $500^{\circ}\text{C}$ 'lik bir sıcaklık meydana gelmekte bunun sonucu olarak tantalyum nano partiküllerden ikinci bir faz teşekkül etmektedir. Tane inceltme sürtünme işlemi sırasında dinamik yeniden kristalleşme yöntemiyle gerçekleşmektedir. Elde edilen üstün mekanik özellikler ise, ortalama tane boyutu  $100 \mu\text{m}$ 'den  $10\text{-}15 \mu\text{m}$  değerlerine inmektedir. Akma gerilmesi  $190 \text{MPa}$ 'dan  $224 \text{MPa}$  değerine ve çekme dayanımı  $262 \text{MPa}$ 'dan  $341 \text{MPa}$  değerine yükseldiğini göstermişlerdir.

Masuku ve ark., (2009), A206 alüminyum alaşımına geleneksel T6 ısıtımından farklı bir proses uygulayarak, çözeltiye alma sıcaklığını yükseltip bekleme süresini kısaltan yeni bir yöntem uygulamışlardır. Geleneksel T6 ısıtımında  $513^{\circ}\text{C}$ 'de 2 saat,  $527^{\circ}\text{C}$ 'de 17 saat çözeltiye alma sonra su verme takibinde  $153^{\circ}\text{C}$ 'de 20 saat yapay yaşlandırma uygulanır. Yeni yöntemde ise  $15^{\circ}\text{C}$ 'de 5 saat,  $570^{\circ}\text{C}$ 'de 10 saat çözeltiye alma sonra su verme, takibinde  $153^{\circ}\text{C}$ 'de 20 saat yapay yaşlandırma yapılarak, sonuçta ortalama sertlik değerlerinin  $105 \text{vickers}$  sertlikten  $113 \text{vickers}$  sertlik değerine yükseldiğini göstermişlerdir.

Liu, Cao ve Chen, (2014), A206 alüminyum alaşımında farklı demir içeriğinin çekme gerilmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Demir oranının artması, çekme gerilmesi ve yüzde uzama değerlerini olumsuz yönde etkilediğini göstermişlerdir.

Sun ve Apelian, (2009), A206-T4 alüminyum döküm alaşımında yeni ve farklı bir yöntem olan sürtünme karıştırma prosesiyle tane boyutu 100  $\mu\text{m}$ 'den 10  $\mu\text{m}$  seviyesinde inceltildiğini göstermişlerdir.

Birru, Karunakar ve Mahapatra, (2012), A206 alüminyum alaşımlarında ergimiş sıvı metalin kalıba döküm sıcaklığı ile malzemenin tane boyutu arasında bir ilişki olduğunu, döküm sıcaklığının nispeten düşük olmasının, tane boyutunun ince olma meylini desteklediğini göstermişlerdir.

Lee ve Kim, (2006), pota içinde direk sıcaklık kontrollü basınçlı döküm yöntemi, A206 alüminyum alaşımına uygulanarak yeni ve farklı bir yöntem olan semi solid prosesiyle, işlem ekipmanlarına, tane incelticilere ve bekleme zamanına gereksinim olmadığını ifade etmişlerdir. Yalnızca belirlenen sıcaklığa indirmek için sıcaklık kontrolü gereken bir yöntem ile eş eksenli tane yapısının; çekirdek sayısına, sıcaklık gradyanına ve katılma oranına bağlı olduğunu göstermişlerdir.

D'Elia, Ravindran ve Sediako, (2012), alüminyum bakır alaşımına tane inceltici mastır alaşım olarak %0.02 Ti ve %0.05 Ti oranlarında girmişlerdir. Tane inceltici girilmeyen alüminyum bakır alaşım numunesinin tane boyutu 1062  $\mu\text{m}$  iken, %0.02 Ti girildiğinde tane boyutu 105  $\mu\text{m}$  ve %0.05 Ti girildiğinde ise tane boyutunun 79  $\mu\text{m}$  değerine indiğini göstermişlerdir.

Talamentes-Silva ve ark., (2008), alüminyum bakır alaşımlarının mikro yapı ve çekme gerilmesi durumuna katılma hızı ve ısıl işlemin etkisi üzerinde çalışmışlardır. İkincil dentritik kol mesafesi, tane boyutu ve porozitenin mikro yapı üzerindeki etkilerini inceleyerek katılma hızının düşmesiyle bu parametrelerin arttığını göstermişlerdir. Isıl işlem sonucu gerilme-şekil değiştirme karakteristiklerinin mikro yapısal parametrelerle ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada ikincil dentritler arası mesafeyi T4 ısıl işleminde 50  $\mu\text{m}$ , T7 ısıl işlem şartlarında 30  $\mu\text{m}$  olarak bulmuşlardır.

Sun ve Apelian, (2014), A206 alüminyum döküm alaşımlarında sürtünme metoduyla kompozit üretimi üzerinde çalışmışlardır. Yeni bir metot olan sürtünme yoluyla bölgesel sertleştirme işlemi gerçekleştiriliyor. 500<sup>o</sup>C sıcaklığa ulaşıyor, 1000 devir/dakika hızla dönen aparat, 50 mm/dakika hızla ilerlemektedir. Bu yöntemin avantajları, malzemenin tamamı değil sadece istenilen yüzey bölgesi işlem görür.

Döküm işleminden sonra kolaylıkla uygulanabilmektedir. Ve katılaşma sonunda hidrojen gaz boşlukları, kalıntı gerilmeler ve matris ile intermetalikler arası istenmeyen reaksiyonların elimine edildiklerini göstermişlerdir.

Lee ve Kim, (2006), direk termal kontrol basınçlı döküm yöntemiyle A206 alüminyum alaşımının mikro yapısal evrimi üzerinde çalışmışlardır. Pota sıcaklığının artışıyla doğru orantılı olarak eş eksenli tane boyutu da artış göstermiştir. Sıvı metalin döküm sıcaklığının  $630^{\circ}\text{C}$ 'de  $67\ \mu\text{m}$  gibi gayet ince taneli olarak elde etmişlerdir.

Haghdadi, Phillion ve Maijer, (2015), B206 alüminyum alaşımının katılaşması sırasındaki mikro yapı belirleme ve termal analizi üzerinde çalışmışlardır. Alüminyum alaşımının katılaşması sırasında yüksek soğuma oranlarında mikro yapının ince yapıldığını ve özellikle ikincil dentritler arası mesafenin kısa olduğunu göstermişlerdir.

Sangchan ve ark., (2014), yarı katı A356 alüminyum alaşımının mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine stronsiyum elementinin etkisi üzerinde çalışmışlardır. Ötektik Al-Si alaşımlarında Sr elementi aşılama olarak kullanıldığında hem modifikasyon hem de tane inceltme etkisine sahiptir. Ağırlıkça %0.08 Sr oranında ilave edildiğinde ve T6 ısıtma işlemi uygulandığında çekme gerilmesi  $291\ \text{MPa}$ , yüzde uzama değeri %17.31 ve ortalama tane boyutu  $132\ \mu\text{m}$  olarak bulunmuşlardır. Stronsiyum ilave oranı %0.20 Sr olarak artırıldığında ise kaba  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$  intermetalik bileşiği teşekkül ederek çekme gerilim değerini ve yüzde uzama değerini düşürdüğünü göstermişlerdir.

Uludağ ve ark., (2014), LM28 alaşımında tane inceltme ve Sr modifikasyonunun Si morfolojisine etkisi üzerinde çalışmışlardır. Döküm sıcaklığı  $750^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulmuş dikey olarak inceden kalına doğru artan basamak şeklinde kum kalıplara dökümler yapılmıştır. Tane inceltici olarak Al-3B kullanmışlardır. Sr ilavesi sonrasında, soğuma hızı arttıkça primer silislerin küçüldüğünü veya parçalandığını, sekonder silislerin boyutlarının küçüldüğünü ve kısmi olarak yayındıklarını yani ötektik fazın hacimsel oranının arttığını göstermişlerdir.

Gan ve ark., (2013), basınçlı Al-%5Cu-Mg dökme alaşımlarının ısıtma işlem özelliklerinin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkileri üzerinde araştırma yapmışlardır. Basınçlı döküm yöntemi, gravite döküm yöntemine göre mikro yapıyı daha inceltmiş ve mikro yayınlamayı azaltmıştır. Döküm sıcaklığı  $740^{\circ}\text{C}$ 'dir. Çözeltiye alma ısıtma işlemi  $495^{\circ}\text{C}$ 'de 9 saat uygulanmış ve 48 saat doğal yaşlanma uygulanmıştır. Çökelti sertleştirme işlemi ise  $190^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat olarak uygulanmıştır. Bunun sonucunda çekme dayanımını  $475\ \text{MPa}$ , yüzde uzamayı %18,9 ve ortalama tane boyutunu ise 60-70  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuşlardır.

Tahamtan ve ark., (2014), mikron boyutlu  $Al_3Ti$  ile  $Al_2O_3$  nano partiküllerinin birleştirilmesiyle yeni bir ağ yapısına sahip olan A206 alüminyum matrisli kompozit malzemenin üstün çekme dayanımı özellikleri üzerinde çalışmışlardır. Uygulanan öğütme ve karıştırma işlemiyle  $Al_3Ti$  partiküllerinin teşekkülü desteklenmektedir. Aynı zamanda teşekkül sıcaklığı ve morfolojisini de değiştirmektedir.  $Al_3Ti$  partikülleri ile  $Al_2O_3$  nano partikülleri tane sınırlarında ağ şeklinde üniform bir dağılım sergilediğini göstermişlerdir.

De Cicco ve Perepezko, (2013), birincil ve ikincil faz çekirdeklenmesi üzerine nano partiküllerin katalitik etkisi üzerinde çalışmışlardır. Metal matrisli nano kompozitlerin katılaşmaları esnasında 10-96 nm tane boyutundaki SiC, TiC ve  $Al_2O_3$  gibi nano partiküller, matris alaşımının çekirdeklenmesinde katalitik rol oynamaktadırlar. Bu nano partiküllerin birinci ve ikinci fazlar için çekirdekçik görevi gördüğünü ifade etmişlerdir.

Chen, Xu ve Li, (2015), katılaşma sırasında nano partiküller ile kontrollü faz büyümesi üzerinde çalışmışlardır. Döküm işleminde katılaşma sırasında istenilen yapıların ve özelliklerin elde edilmesinde faz büyümesinin kontrolü elzemdir. Katılaşma esnasında büyüme ara yüzeyinde nano partiküllerin bağlanmasıyla baskın fazın büyümesi kontrol edilmektedir. Tane büyümesinin nano partiküllerin etkin kontrolüyle birinci  $\alpha$  faz boyutu oldukça küçültülerek dentritik büyümenin sınırlandırıldığını göstermişlerdir. Jitao, Mingfang, Zhenqing ve Lidan, (2019),  $Al-5Ti-x(Mg-30 Ce)$  tane incelticinin  $Al-7Si$  alaşımının mikro yapısı üzerindeki etkilerini inceleyerek,  $Al-Si$  alaşımının sertlik, çekme ve darbe özelliklerini incelemişlerdir.

Taramalı elektron mikroskobu ve enerji spektrum analizi sonuçlarından, çökelmiş ikincil fazlardaki çubuk şeklindeki yapının 20-40  $\mu m$  radyal bir boyuta ve 100 ila 300  $\mu m$  aksenal boyuta sahip olduklarını göstermişlerdir.  $Al-7Si-(Al-5Ti-2(Mg-30 Ce))$  alaşımının darbe tokluğunu  $34.91 J/cm^2$  bularak tane inceltmeden önceki  $Al-7Si-(Al-5Ti)$  numunelere göre % 78.7 daha yüksek oranda elde etmişlerdir.

Wanwu ve ark., (2014),  $Al-5Ti-C$  tane inceltici mastır alaşımının hiper ötektik  $Al-20 Si$  alaşımının mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkileri üzerinde çalışmışlardır. Hiper ötektik  $Al-20 Si$  alaşımına ağırlıkça %0, %0.4, %0.6, %1.0, %1.6 ve %2.0 oranlarında  $Al-5Ti-C$  mastır alaşımı ilave ederek bu alaşımın mikro yapı evrimi ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir.  $Al-5Ti-C$  mastır alaşımı ilavesinde en iyi sonuçları, ağırlıkça %0.6  $Al-Ti-C$  ilavesi ve 10 dakika bekleme süresinde elde etmişlerdir. Hiper ötektik  $Al-20 Si$  alaşımının hem ötektik hem de birincil

silisyumlarının tane boyutları önemli ölçüde inceltirilmiştir. Birincil Si kristallerinin morfolojisi, büyük bir kaba poligonal ve yıldız benzeri şekilden ince bir çokyüzlü şekle dönüşmüş ve birincil Si'nin tane büyüklüğü yaklaşık 90-120  $\mu\text{m}$ 'den, 20-50  $\mu\text{m}$ 'ye rafine edilerek inceltirilmiştir. Al-5Ti-C ana alaşımı ağırlıkça %0.6, 10 dakika ile modifiye edilmiş ve böylece Al-%20 Si alaşımının nihai gerilme dayanımı %65, yüzde uzama %70 ve Brinell sertliği %51 oranlarında, primer Si ve ötektik Si kristallerinde boyut küçültme ve morfolojiyi değiştirme nedeniyle iyileştirme sağlamışlardır.

Otomotiv endüstrisinin trendi; konforlu, ekonomik, yüksek güçlü, güvenli ve ekolojik araçların inşasına doğru gitmektedir. Bakır ihtiva eden Al alaşımları ile Mg ve Si içeren alüminyum alaşımları çökeltme sertleşmesi mekanizmalarına sahip olduklarından dolayı dökümden sonra bunlara yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilmektedir. Isıl işlemin malzemeye kazandırdığı faydalar tartışmasız olmasına rağmen, endüstride ısıl işlem operatörleri için yüksek performans ve güvenliğe sahip piyasa beklentileri, daha düşük üretim maliyetleri ve çevresel etkiler ile enerji kullanımı konusundaki hala bazı zorluklar vardır.

Çözeltiyeye alma ve yaşlandırma ile sertleşebilen bazı alüminyum alaşımlarının (Al-%5Cu alaşımları gibi) ısıl işlemi, bu alaşımların çözülmesini, söndürülmesini ve takibinde oda sıcaklığında tabii yaşlanma veya yüksek bir sıcaklıkta suni yaşlanmayı içerir. (Mohamed ve Samuel, 2019). Alüminyum döküm alaşımlarından 3xxx serisi ile Al-Si-Cu/Mg alaşımları literatür taramasına göre iyi çalışılmıştır. Alaşım elementlerinin ve katılma yüzde oranlarının mikro yapı oluşumuna etkisi üzerinde çok fazla yayın vardır. (Mohamed, Samuel ve Alkahtani, 2012; Mohamed, Samuel ve Doty, 2009; ve Djurdjevic ve ark., 1999).

Schneider ve ark., (1998), tane inceltici mastır alaşım olan Al-Ti-B ile Al-Ti-C'ü tane inceltmedeki performanslarını karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. Farklı alüminyum dövme alaşımları üzerinde yaptıkları bu çalışmada, Al-Ti-C mastır alaşımlarının Al-Ti-B alaşımlarına yeni bir alternatif olduğunu göstermişlerdir. Bu konuyla ilgili yaptıkları araştırmalarda, belirlenmiş döküm şartlarında, Al-Ti-C mastır alaşımının Al-Ti-B tane incelticisine göre daha etkin olduğunu, daha az topaklanma eğilimi olduğunu ve zirkonyum, sezyum gibi elementlerin zehirlenme etkisine karşı daha dirençli olduğunu göstermişlerdir.

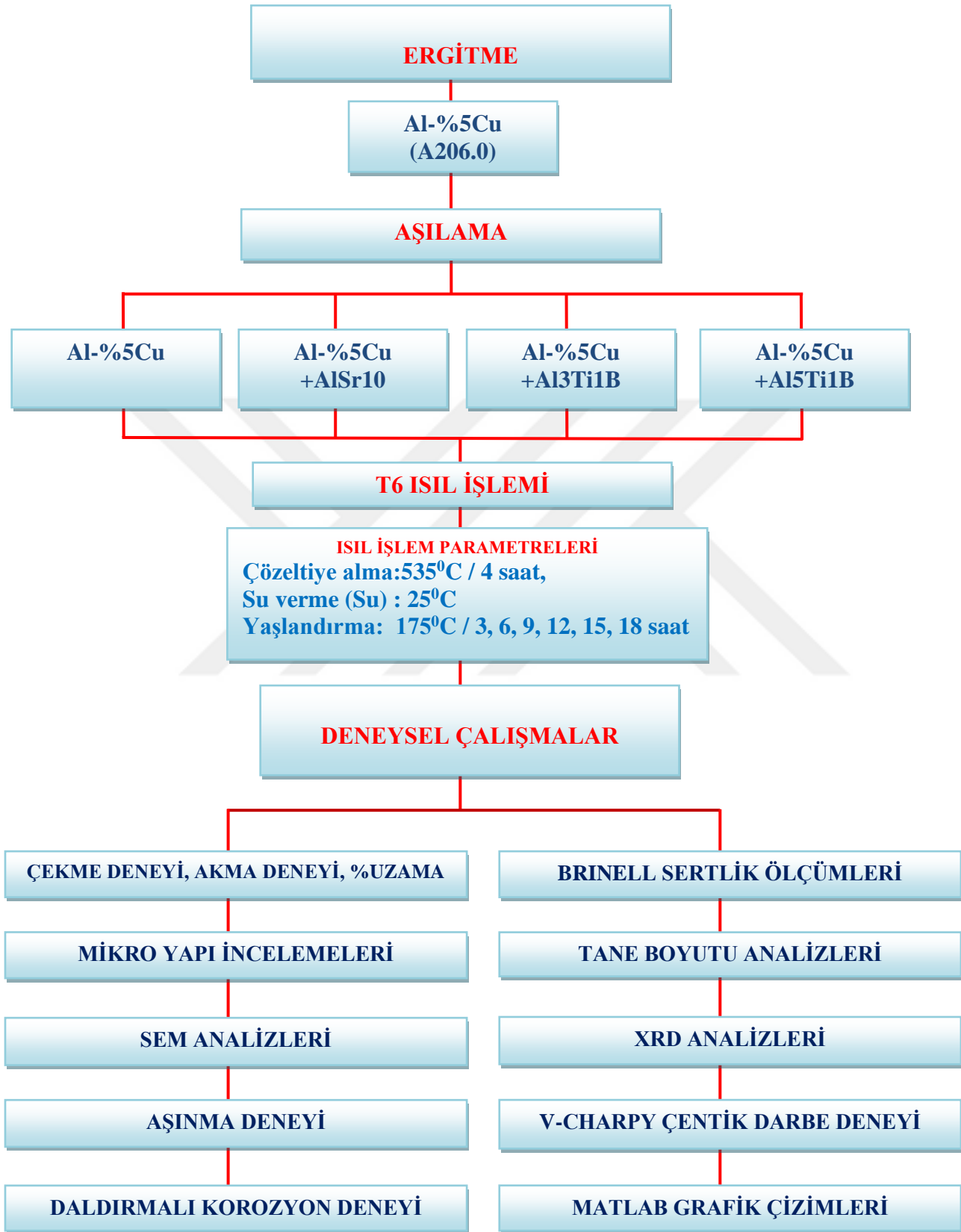
Katı hal çekirdeklenme ve çökeltme büyümesinin elektron yoğunluk baskınlık teorisi, kristalografik açıdan alaşımlardaki faz dönüşümlerini rasyonelleştirmenin yeni bir aracı olarak tanıtılır ve tartışılır. (Nakashima ve Philip, 2018). Malzemelerin kristal



yapılarının anlaşılmasında hiyerarşik dört husus vardır. Bunlar: (a) Kristal yapının doğası ve bu yapının tarif edilmesi. (b) Kafes parametresinin büyüklüğü, katı haldeki alüminyumun herhangi bir sıcaklık değeri, yani termal genişleme katsayısı. (c) Kristal kafes içerisindeki atomik titreşimlerin genliği, alüminyumun katı olduğu bir sıcaklık aralığında ve sıcaklığın fonksiyonu olarak ve (d) Atomlar arasındaki bağların niteliği. (Nakashima ve Philip, 2018).



## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR



Şekil 7.1. İş Akış Diyagramı

## 7.1. Üretim

### 7.1.1. Döküm İşleminin Yapılması

A206.0 alüminyum bakır alaşımını elde etmek için ticari safiyetteki E7 (%99.7 Al) alüminyum külçe kullanılmıştır. Ayrıca saf bakır tel (%99 Cu), külçe halinde mangan (%65 Mn) ve magnezyum katı halde girilerek döküm yapılmıştır. Çizelge 7.1.'de bu çalışmada kullanılan E7 saf alüminyumun ağırlıkça yüzde kimyasal bileşimi verilmiştir. Çizelge 7.2.'de ise A206.0 alüminyum bakır alaşımının ağırlıkça yüzde kimyasal bileşim aralıkları görülmektedir. Aralık olarak verilmeyen element değerleri maksimum değerlerdir.

Döküm için gerekli malzemeler hazırlandıktan sonra Konya Teknik Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümü Döküm Laboratuvarında elektrik rezistanslı döküm ocağında dökümler yapılmıştır. Alüminyum bakır alaşımının ergitilmesi için Şekil 7.2.'de görülen laboratuvar tipi elektrik rezistanslı ergitme ocağı kullanılmıştır. Şekil 7.3.(a)'da E7 alüminyum külçe ile Şekil 7.3.(b)'de magnezyum külçe parçaları görülmektedir. Pota olarak 50 kg'lık SiC pota kullanılmıştır. Elektrik rezistans teli Cr-Ni alaşımlı 1,5 mm çapında kanthal teldir. Ticari safiyetteki E7 külçeler 15 kg ergimiş sıvı metal kapasiteli SiC potaya konularak ergitilmiştir. Ergitme işlemi için 760°C sıcaklığa 84 dakikada ulaşılmış ve bu sıcaklıkta diğer alaşım elemanları girilmiştir. Cürufu almak için örtü tozu sıvı metalin üzerine serpilmiştir.

Ergimiş durumda döküme hazır haldeki alaşım, Şekil 7.4'te görülen, GGG50 sfero kalite malzemedan yapılan sekizli çekme çubuk numune kalıbına dökülmüştür. Kokil kalıpta sekiz adet çekme çubuğu için parçalar dikey olarak yerleştirilmiş ve yolluk düzeneği alttan beslemeli tasarlanmıştır. Her farklı alaşım çeşidi için iki ayrı döküm yapılmıştır. Dört farklı alaşım grubu ile çalışılmıştır. Bunlar tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşım grubu, AlSr10 tane inceltici mastır alaşım ilave edilen Al-%5Cu alaşım grubu, Al3Ti1B tane inceltici eklenen Al-%5Cu alaşım grubu ve Al5Ti1B tane inceltici ilave edilen Al-%5Cu alaşım gruplarıdır.



**Şekil 7.2.** KTÜN Metalurji ve Malzeme Bölümü Döküm Laboratuvarında deneysel çalışmalarda kullanılan 15 kg'lık potaya sahip elektrik rezistanslı ertirme ocağı



(a)



(b)

**Şekil 7.3.** (a) E7 Ticari safiyette alüminyum külçe (b) Magnezyum külçe

**Çizelge 7.1.** Seydişehir Etial E7 / EN AC 46200 saf alüminyum külçenin ağırlıkça % kimyasal bileşimi aşağıda görülmektedir:

Malzeme Kalitesi	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ni	%Ti	%Al
E7/EN AC 46200	0.10	0.15	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	Kalan

**Çizelge 7.2.** A206.0 alaşımının nominal kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça % olarak) (Metals Handbook, 1989)

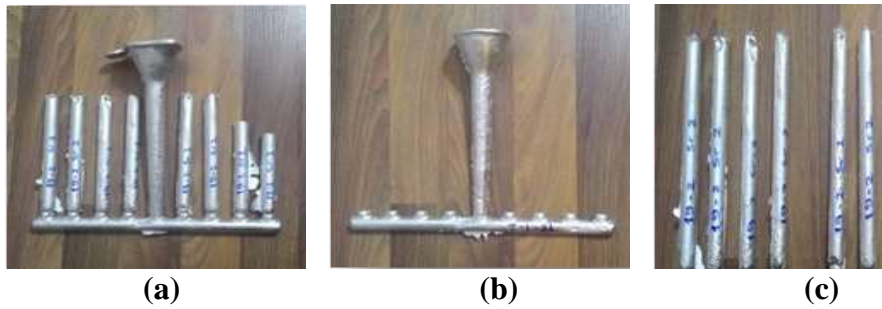
Alaşım	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ni	%Ti	%Al
A206.0	0.10	0.15	4.2-5.0	0.2-0.5	0.15-0.35	0.10	0.05	0.15-0.30	Kalan

### 7.1.2. Çekme Çubuk Numunelerinin Kalıbı

Deneylerde kullanmak için gereken; çekme çubuk numuneleri, çentik darbe numuneleri, Brinell sertlik ölçme numuneleri, mikro yapı inceleme numuneleri, tane boyutu inceleme numuneleri, aşınma deney numuneleri, korozyon deney numuneleri, XRD inceleme numuneleri ve SEM inceleme numunelerini elde etmek için sfero GGG50 malzemedен kokil kalıp yapılmıştır. Her dökümde sekiz adet çubuk parçası dökümü elde edilmiştir. Çekme çubuğu kalıbına döküm yapılmadan önce çatlama riskine karşılık yaklaşık 250°C sıcaklığa ön ısıtma yapılmıştır. Ayrıca numunelerin kalıptan kolay ayrılabilmesi amacıyla kalıp boyası ile boyanmıştır. Bu çalışmada kullanılan kokil kalıp Şekil 7.4.'te görülmektedir. Alaşımların yolluk ve besleyicilerle beraber dökülmüş halleri ile numunelerin yolluk ve besleyicilerden kesilmiş halleri Şekil 7.5.'te görülmektedir.



Şekil 7.4. GGG50 sfero kalite malzemedен yapılan sekizli çekme çubuk numunelerinin kalıbı



Şekil 7.5. Al-%5Cu alaşımından dökülmüş as-cast çekme çubuk parçaları: (a) yolluklar ve besleyiciler kesilmemiş halde, (b) kesilmiş halde yolluk (c) dökülmüş işlenmemiş ham numuneler

### 7.1.3. Ergimiş Metalde Gaz Giderme İşlemi

Ergimiş sıvı metalin gazını almak için 100 gramlık, Typhoon Superdega10 marka hegzakloreten ( $C_2Cl_6$ ) degazer tableti %0,5 oranında kullanılmıştır. Degazer

tableti aynı zamanda karıştırma işlemine katkıda bulunmaktadır. Kimyasal bileşim için numuneler alınıp daha sonra döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu tabletler sıvı metale daldırıldığında kimyasal olarak reaksiyona girer ve ortama  $Cl_2$  ve  $CO_2$  gazları verirler. Sistemde kimyasal tepkimeler sonucu  $AlCl_3$  gaz kabarcıkları oluşmuştur. Çok hızlı çözünen bu tabletler potanın dip kısmından verilerek, ortaya çıkan gaz kabarcıkları yüzeye doğru ilerlerken hidrojen kabarcıklarını yukarı doğru taşırlar, böylece gazların daha etkin biçimde atılmasını sağlarlar. Şekil 7.6.'da Typhoon Superdega10 gaz giderici tablet görülmektedir.



Şekil 7.6. Typhoon Superdega 10 marka alüminyum döküm gaz giderici tablet

#### 7.1.4. Tane İnceltici Mastır Alaşımların Girilmesi

$Al-3Ti-1B$ ,  $Al-5Ti-1B$  ve  $AlSr10$  olmak üzere üç farklı tane inceltici mastır alaşımlar %0,6 oranında ayrı ayrı girilerek döküm yapılmıştır. Mastır alaşımlar 10 mm çapında ve 100 gram ağırlığında metal çubuk parçalar halindedirler ve bunlar Şekil 7.7'de görülmektedirler. Tane incelticiler girildikten sonra sıvı metal karıştırılıp 5-6 dakika gibi kısa sürede döküm yapılmıştır. Döküm işlemi fazla geciktirilirse aşılaiıcıların etkisinin azalması söz konusudur.  $Al-5Ti-1B$ ,  $Al-3Ti-1B$  ve  $AlSr10$  tane inceltici mastır alaşımların ağırlıkça yüzde kimyasal kompozisyonları aşağıdaki Çizelge 7.3'te verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.7. Çubuk halde tane inceltici master alaşımlar: (a) Al-5Ti-1B mastır alaşım çubuğu (b) Al-3Ti-1B mastır alaşım çubuğu (c) AlSr10 mastır alaşım çubuğu

Çizelge 7.3. Al-5Ti-1B, Al-3Ti-1B ve AlSr10 tane inceltici mastır alaşımlarının ağırlıkça % kimyasal bileşimleri

Master Alaşım	%Si	%Fe	% B	% Ti	%Cu	%Mg	%Mn	%Zn	%Sr	%Ca	% Al
Al-%5Ti-1B	0.10	0.30	0.9-1.1	4.5-5.5	0.02	0.02	0.02	0.10	-	-	Kalan
Al-%3Ti-1B	0.05	0.10	0.9-1.1	2.8-3.4	0.02	0.02	-	0.10	-	-	Kalan
AlSr10	0.20	0.30	-	-	-	-	-	-	9-11	0.03	Kalan

### 7.1.5. T6 Isıl İşleminin Yapılması

Al-Cu alaşımlarının yapısında bulunan Cu elementi  $\text{CuAl}_2$  bileşiği olarak tane sınırlarında çöker. Bu durum malzemenin mukavemetinin düşmesine sebep olur.

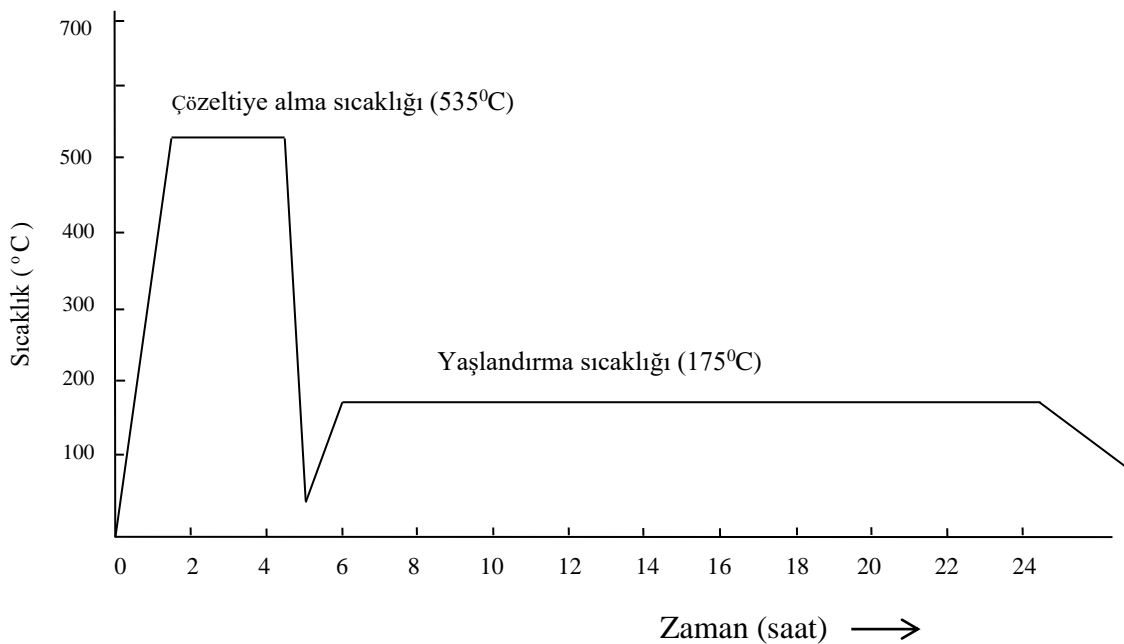
Çökeltme sertleşmesi işlemiyle tane sınırlarında çökelmiş olan  $\text{CuAl}_2$  bileşiği difüzyon yoluyla önce alaşımın içerisinde çözündürülür. Sonra tane içinde homojen bir şekilde dağıtılarak malzemenin mukavemeti artırılır. Bu sebeple çökeltme sertleşmesi mekanizmasına dağılım mukavemetlenmesi de denilir. T6 ısıl işleminin üç aşaması vardır. Bunlar çözündürme işlemi veya diğer bir deyişle solüsyona alma, sonra su verme ve yaşlandırma işlemleridir (Türköz, M., 2009).

T6 ısıl işlemiyle yapılan yapay yaşlandırma, doğal yaşlandırmaya göre daha kısa sürede malzemeyi kararlı hale getirmektedir. T6 ısıl işlemiyle korozyona karşı daha dirençli bir malzeme elde edilebilmektedir (Türköz, M., 2009). Fakat T6 ısıl işleminde malzemenin sünekliğinin azalmasını bir dezavantaj olarak belirtebiliriz. Tavlama işlemiyle alaşımın mikro yapısında dislokasyon yoğunluğu minimum seviyeye inmiş olan yeni kristal yapılar teşekkül eder. Başlangıçta ince taneli olan alaşımın kristal

yapısı, malzemenin aşırı tavlama halinde tane büyümesi meydana gelir ve kaba taneli bir yapı oluşur (Türköz, M., 2009). Bu durumda malzemenin sünekliği artar fakat sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerde azalma görülür.

Bu çalışmada T6 ısıl işlemi; Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Isıl İşlem Laboratuvarında Protherm marka elektrik rezistanslı dijital programlı fırın ile yapılmıştır. Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı ile AlSr10, Al-3Ti-1B ve Al-5Ti-1B tane incelticileri girilerek elde edilen toplam dört grup Al-%5Cu alaşımlarının dökümleri yapılmıştır. Sonra bu dökülen parçalardan çekme çubuk numuneleri, çentik darbe numuneleri, Brinell sertlik ölçüm numuneleri, mikro yapı numuneleri, tane boyutu inceleme numuneleri, aşınma numuneleri, XRD ve SEM inceleme numuneleri ve korozyon numuneleri hazırlanmıştır. Seçilen numuneler markalama ile numaralandırılmıştır.

Daha sonra seçilen bu numunelere T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. T6 ısıl işlem periyodunun üç aşaması vardır. Bu aşamalar; çözeltili alma, su verme ve yaşlandırma olarak ifade edilebilir. Öncelikle çözeltili alma işlemi yapılmıştır. Çözeltili alma sıcaklığı olarak 535<sup>0</sup>C sıcaklığı seçilmiştir. Numuneler bu sıcaklıkta 4 saat bekletilmişlerdir. Bu aşamadan sonra oda sıcaklığında 25<sup>0</sup>C'de su verme işlemi birkaç saniye gibi kısa bir sürede gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yapay yaşlandırma işlemi 175<sup>0</sup>C'de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi altı farklı sürelerde yapılmıştır. Şekil 7.8.'de T6 ısıl işleminin yapıldığı sıcaklık-zaman periyodu görülmektedir.





**Şekil 7.8.** A206.0 alaşımına uygulanan T6 ısıtımının sıcaklık - zaman periyodu

Şekil 7.9'da T6 ısıtımının yapıldığı laboratuvar tipi elektrik rezistansı ile ısıtılan Protherm marka fırın görülmektedir.



**Şekil 7.9.** Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Isıl İşlem Laboratuvarında, T6 ısıtımının yapıldığı dijital kontrol programlı Protherm marka ısıtma fırını

#### 7.1.6. Mikro Yapı İnceleme Numunelerinin Hazırlanması

Mikro yapı ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) numunelerini elde etmek için sfero GGG50 malzemedan kalıp yaptırılmıştır. Her dökümde sekiz adet numune parçası dökülmüştür. Her farklı alaşım için iki defa döküm yapılmıştır. Döküm işleminden sonra elde edilen parçalar dört farklı alaşım çeşidine göre (Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı, AlSr10 eklenen Al-Cu alaşımı, Al<sub>3</sub>Ti1B ilave edilen Al-Cu alaşımı ve Al<sub>5</sub>Ti1B ile aşılana Al-Cu alaşım grubu olarak) sınıflandırılmışlardır. Numunelerin kesildiği ıslak kesme makinesi Şekil 7.10.'da görülmektedir. Metalografik işlemlerin yapıldığı yüzey zımparalama ve parlatma işlemlerinin yapıldığı makine Şekil 7.11.'da görülmektedir.



**Şekil 7.10.** KTÜN Metalurji ve Malzeme Bölümü Metalografi laboratuvarındaki Metkon marka ıslak metal kesme cihazı



**Şekil 7.11.** Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalografi laboratuvarındaki Metkon marka yüzey temizleme ve parlatma cihazı

Mikro yapı incelemeleri ve Brinell sertlik ölçümlerinin yapıldığı numuneler Şekil 7.12.'de görülmektedir. Çekme çubuk numuneleri koparıldıktan sonra, bu numunelerin kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskop incelemeleri için hazırlanmıştır ve bu numuneler Şekil 7.13.'de görülmektedir.



**Şekil 7.12.** Mikroyapı incelemeleri için yüzeyi temizlenmiş parlatılmış numuneler



**Şekil 7.13.** Taramalı elektron mikroskop incelemeleri için koparılmış çekme çubuk numunelerinden hazırlanmış kırık yüzey SEM numuneleri

## 7.2. KARAKTERİZASYON

### 7.2.1. Mikro Yapı İncelemeleri

T6 ısıl işlemi; 535<sup>0</sup>C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25<sup>0</sup>C'de su verme ve sonrasında 175<sup>0</sup>C'de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı sürelerde yapay yaşlandırma uygulanan numunelerin yüzeyleri parlatılıp keller sıvısıyla dağlama yapıldıktan sonra mikro yapıları incelenmiştir. Şekil 7.14.'te bu çalışmada kullanılan dört farklı alüminyum bakır alaşımının mikro yapılarının incelendiği ve fotoğraflarının alındığı metal optik mikroskop görülmektedir.

Optik mikroskop incelemelerinde X50, X100, X200 ve X500 gibi dört farklı büyütme oranları seçilmiştir. Mikro yapı incelemeleri; Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalografi Laboratuvarında, Nikon ECLIPSE MA100 marka metal mikroskobu ile yapılmıştır. KOZO marka TCA-300A model mikroskop kamerası ile fotoğraf görüntüleri bilgisayara aktarılarak, bu mikro yapı fotoğrafları bilgisayardan alınmıştır.



**Şekil 7.14.** Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalografi Laboratuvarında bu çalışmada kullanılan dört farklı Al-%5Cu alaşım numunelerinin mikro yapılarının incelendiği kameralı metal optik mikroskobu

### 7.2.2. Tane Boyutu Analizleri

Ortalama tane boyutu ölçümleri, İmage J Görüntü Analiz Metodu ile her bir resimden 20-40 örnek alınarak yapılmıştır. Optik mikroskopta X50, X100, X200 ve X500 büyütmelemede dört farklı mikro yapı fotoğraf görüntüsü alınmıştır. Ortalama tane boyutu ölçümleri için X100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri üzerinden ölçüm yapılmıştır. Bu yöntemde  $\text{in}^2$  olarak birim alandaki tanelerin kaç mikron büyüklüğünde ve kaç adet olduğu İmage J programı tarafından hesaplanarak grafik olarak verilmektedir. Optik mikroskop fotoğraf çerçevesi ölçeği; 60 mm yükseklik, 80 mm uzunluktur. Bu çerçevedeki resimler için 100  $\mu\text{m}$  birim ölçek kabul edilmiştir. Bu ölçekler her fotoğraf üzerinde gösterilmiştir.

### 7.2.3. Taramalı Elektron Mikroskobu SEM ve EDS İncelemeleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri; İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi Selçuk İtek Laboratuvarında, ZEISS EVO LS10 marka cihaz ile yapılmıştır. Şekil 7.15'te SEM incelemelerinin yapıldığı ZEISS EVO LS10 marka Taramalı Elektron Mikroskobu görülmektedir. SEM incelemelerinde; çekme testlerinde kopartılan, çekme çubuk numunelerinin kırık yüzeyleri incelenerek görüntü alınmıştır. Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı ile AlSr10, Al-3Ti-1B ve Al-5Ti-1B tane incelticileri girilen Al-%5Cu alaşımlarına 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de su verme, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Daha sonra bu dört farklı alüminyum bakır alaşım numuneleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

SEM incelemeleri üç bölümde yapılmıştır. Birinci bölümde; SE detektörü ve WD, EHT, pA parametreleri kullanılarak yüksek vakumda, yüksek çözünürlükte numunenin yüzey görüntüleri alınarak karakterize edilmiştir. İkinci bölümde; yüksek voltaj uygulanmak suretiyle X-ışını konsantrasyonu artırılıp, numunenin 200 nm yüzeyinden soğurma yapılarak görüntü alınmıştır. EDX nokta ve alan analizleri ile numune yüzeyinde seçilen bölgelerdeki elementlerin dağılımları yüzde olarak belirlenmiştir.

Üçüncü bölümde; EDX Haritalama analizi (EDX Mapping) yapılmıştır. Numunenin yüzeyinden 200 nm derinlikte soğurma yapılarak, seçilen bölgedeki elementlerin oranları, ağırlıkça ve atomik yüzde oranlarıyla belirlenmiştir. Önce

numune yüzeyinde belli bir alan seçilmiştir. Seçilen alandaki elementlere renk ataması yapılarak alınan görüntü renkli olarak resmedilmiştir. Böylece alaşımın içerisinde bulunan elementlerin yerleri ve dağılımları bu renkler vasıtasıyla görülebilmektedir.



Şekil 7.15 Selçuk İltek Laboratuvarında SEM incelemelerinin yapıldığı ZEISS EVO LS10 marka Taramalı Elektron Mikroskobu

#### 7.2.4. XRD İncelemeleri

X-ışını difraksiyonu (XRD) ölçümleri, İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi Selçuk İltek Laboratuvarında, BRUKER D8-ADVANCE marka cihaz ve EVA programı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.16'da XRD analiz incelemelerinin yapıldığı BRUKER D8-ADVANCE marka XRD analiz cihazı görülmektedir. Bu incelemelerde kullanılan bütün numunelere, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi farklı sürelerde yapay yaşlandırma uygulanmıştır. XRD ölçümleri, hem kopartılmış olan çekme çubukların kırık yüzeylerinden hem de toz yöntemi ile hazırlanan numunelerden yapılmıştır. XRD analizlerinde  $\lambda=1,54060 \text{ \AA}$  dalga boyu ve Cu K $\alpha$  1 radyasyonu uygulanmıştır.



**Şekil 7.16.** Selçuk İtek Laboratuvarında XRD incelemelerinin yapıldığı BRUKER D8 ADVANCE marka XRD cihazı

### 7.3 MEKANİK ÖZELLİKLER

#### 7.3.1 Brinell Sertlik Ölçümleri

Brinell sertlik ölçümleri, Konya Teknik Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarında, 2,5 mm'lik bilye çapı ve 62,5 kg'lık yük özellikli dijital gösterimli Brinell sertlik cihazı ile yapılmıştır. Şekil 7.17.'de sertlik ölçümlerinin yapıldığı Brinell sertlik ölçme cihazı görülmektedir. Brinell sertlik ölçüm numuneleri EN ISO 6506 standardına göre hazırlanmıştır.



**Şekil 7.17.** KTÜN Metalürji ve Malzeme Bölümü Metalografi Laboratuvarındaki Brinell sertlik ölçme cihazı

### 7.3.2 Çekme Deneyleri

Çekme deneyi, metalik malzemelerin statik yükleme şartları altında mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Metal ve alaşımlara en çok uygulanan mekanik deneylerden biridir. Çekme deneyi, tasarım esnasında ihtiyaç duyulan, malzemenin en önemli mekanik özellikleri hakkında bilgi verir. Çeşitli mühendislik uygulamalarındaki malzeme seçiminde, malzemelerin gerekli olan kalite standardının sağlandığının veya sağlanmadığının kontrolünde çekme deneyleri yol gösterir. Çekme deneyleri, yeni bir proses veya malzeme geliştirilmesinde, farklı malzemelerin mukayese edilmesinde ve çalışma şartlarında malzemelerin davranışlarının tahmininde geniş ölçüde kullanılmaktadır (Ders Notları, 2016).

Çekme mukavemeti malzemelerin standartlara uygun olup olmadığının denetlenmesinde ve kalite kontrol amaçlı kullanılır. Çekme mukavemeti gevrek malzemeler için uygun bir tasarım kriteridir. Çekme deneyi yapılırken, standartlara uygun bir deney numunesine, tek eksenli sabit bir hızla artan çekme kuvveti uygulanır. Uygulanan bu eksenel kuvvet ile numunenin boyunda gerçekleşen uzama miktarı deney cihazı tarafından sürekli bir şekilde kaydedilerek Yük-Uzama eğrisi elde edilmiş olur. Fakat çekme deneyi ile mekanik özelliklerin belirlenmesinde, elde edilen bu eğri üzerindeki değerler doğrudan değil, bazı formüller yardımıyla gerilme değerlerine dönüştürülerek kullanılır. Bu yeni değerler, “Birim Şekil Değişimi” ve “Gerilme”dir. Gerilme “ $\sigma$ ” işareti ile ifade edilir, birim alandaki yükü gösterir. Bu gerilme değerleri, Yük-uzama eğrisi üzerinde herhangi bir yük değerinin, numunenin deney başlangıcındaki kesit alanına bölünmesiyle bulunur.

$$\sigma_{\text{ç}} = P_i / A_0 \quad (7.1)$$

Burada;

$\sigma_{\text{ç}}$ : Çekme Gerilmesi,

$P_i$ : Numuneye uygulanan anlık yük değeri,

$A_0$ : Deney numunesine ait başlangıç kesit alanıdır

Birim Şekil Değişimi “ $\epsilon$ ” ile gösterilir. Çekme deneyi yapılırken numunede meydana gelen uzama değerinin, numunenin başlangıç uzunluğuna oranı şeklinde ifade edilir. Yine yük-uzama eğrisindeki herhangi bir uzama değerinin, numunenin başlangıç uzunluğuna bölünmesiyle elde edilir.

Birim şekil değişimi, malzemenin şekil değiştirme yeteneğiyle yani sünekliğiyle ilgilidir. Çekme deneyinde, Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini tanımlamakta kullanılan parametreler ise; çekme mukavemeti, akma mukavemeti, %birim şekil değişimi ile %kesit daralması değerleridir. İlk iki parametre mukavemetle ilgilidir, diğer iki parametre ise süneklikle ilgilidir. Çekme mukavemeti ile malzemenin sertliği arasında;

$$HB = 0.35 \times \sigma_c \quad (7.2)$$

(HB: Brinell sertlik değeri) şeklinde yaklaşık bir bağıntı vardır.

Akma olayı, çekme deneyi sırasında elastik deformasyonun sona ererek plastik deformasyonun başladığı noktayı ifade eder. Akma mukavemeti, plastik deformasyonun başladığı noktaya kadar olan gerilme değerini tanımlar. Gerilme-birim şekil değişimi grafik eğrileri üzerinde akma bölgesi, lineer (elastik)/lineer olmayan (plastik) bölgeler arasında, geçiş bölgesi olduğundan dolayı kolayca görülebilir.

Elastik limitin ölçülmesindeki pratik güçlükler yüzünden, %0,2 birim şekil değişim değerlerinden hesaplanan akma mukavemeti değerleri geniş ölçüde kullanılır. Akma gerilmesi ( $\sigma_{0,2}$ ) şeklinde de gösterilir.

Süneklik, herhangi bir malzemenin plastik deformasyon yeteneğinin bir ölçüsüdür. Çekme deneyi sonucunda, yüksek birim şekil değişimi gösteren malzemeler “sünek malzeme” olarak ifade edilir. Tasarımcı açısından bir malzemenin süneklik değerinin sayısal olarak bilinmesi, malzeme kırılmadan önce ne kadar deforme olabileceği hakkında bir fikir verir. Böylelikle, malzemenin kırılmadan önce deformasyona uğradığı konumda, uygulanan gerilmenin fazla olduğu anlaşılabilir gerekli önlemler alınır. Diğer yandan süneklik ölçümü, malzemenin kalite kontrolünün bir göstergesidir. Malzeme yapısında bulunan yabancı maddeler (empüriteler) malzemenin sünekliğini düşüreceğinden dolayı, sünekliğin bilinmesiyle malzemenin kalitesi hakkında da bilgi sahibi olunur.

Çekme deneyi ile malzemenin sünekliğinin belirlenmesinde iki yöntem kullanılır. Bunlar, “Kopma Birim Şekil Değişimi = Kopma Uzaması” ve “Kopma kesit daralması”dır. Kopma uzaması “%Uz” ile kesit daralması da “%A” sembolüyle gösterilir. Ve her iki değer de yüzde olarak ifade edilirler.

$$\% Uz = [(L_o - L_s) / L_o] \times 100 \quad (7.3)$$

$$\% A = [(A_o - A_s) / A_o] \times 100 \quad (7.4)$$

Burada:



$L_0$ : Numunenin deney başlangıcındaki ilk uzunluğu,

$L_s$ : Numunenin kırıldıktan sonraki uzunluğu

$A_0$ : Numunenin deney başlangıcındaki ilk kesit alanı,

$A_s$ : Numunenin kırıldıktan sonraki kesit alanı olarak tanımlanmıştır.

Sünekliğin ölçümünde kullanılan iki değerden kopma uzamasının, numunenin ölçü uzunluğuna bağlı olarak değişmesi ve boyunlaşmadan etkilenmesi nedeniyle, kesit daralması ölçümleriyle hesaplanan süneklik değeri, numunenin maruz kaldığı deformasyon koşullarını ve malzemedeki kalite değişimlerini daha iyi yansıtmaktadır.

Elastisite Modülü (E): gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin başlangıçtaki elastik deformasyon bölgesinin eğimi olarak tanımlanır. Elastisite modülü E;

$$E = \sigma / e \quad (7.5)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Burada;

E: elastisite modülü (GPa),

$\sigma$ : elastik bölge içerisinde herhangi bir gerilme değeri (MPa),

e: gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değişimi (%) değeri olarak tanımlanır.

Elastisite modülü, atomlar arası bağ kuvvetleriyle ilgili bir değerdir. Atomlar arası bağ kuvvetleri, kimyasal bileşim ve deformasyondan etkilenmez. Dolayısıyla, bu parametrelerin değişmesiyle malzemenin elastisite modülü değişmez, bu bakımdan elastisite modülü gerçek bir malzeme özelliği olarak bilinir. Ancak elastisite modülü sıcaklıkla değişir ve sıcaklık arttıkça elastisite modülü düşer. Çizelge 7.4'de bazı malzemelerin Elastik modülleri, Akma dayanımları ve Rezilyans değerleri verilmiştir.

Rezilyans; bir malzemenin elastik deformasyon bölgesi içerisinde birim hacim başına enerji absorplama yeteneğinin bir ölçüsüdür. Gerilme-birim şekil değişimi eğrisinde, elastik deformasyon bölgesinin alanı olarak tanımlanır.

$$U_R = \sigma_a^2 / 2E \quad (7.6)$$

Burada;

$U_R$ : Rezilyans (kJ/m<sup>3</sup>)

$\sigma_a$ : akma mukavemeti (MPa)

E: elastisite modülü (GPa) olarak tanımlanır.

Tokluk; bir malzemenin kırılmaya kadarki deformasyon bölgeleri içerisinde birim hacim başına enerji absorblama yeteneğidir. Gerilme-birim şekil değişimi eğrisi altındaki toplam alan olarak tanımlanır. Tokluk modülü ( $U_T$ ) ile gösterilir.

Buna göre gevrek malzemeler için tokluk ( $U_T$ );

$$U_T = 2/3 \cdot \sigma_c \cdot e_f \quad (7.7)$$

Sünek malzemeler için tokluk:

$$U_T = [(\sigma_a + \sigma_c)/2] \cdot e_f \quad (7.8)$$

Burada;

$U_T$ : tokluk,

$\sigma_a$ : akma mukavemeti (MPa),

$\sigma_c$ : çekme mukavemeti (MPa),

$e_f$ : kopma uzaması (%),

olarak tanımlanmıştır.

**Çizelge 7.4.** Bazı farklı malzemelerin Elastik modülleri, Akma dayanımları ve Rezilyans değerleri

	E (GPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$U_R$ (kPa)
Orta karbonlu çelik	207	310	232
Yüksek karbonlu yay çeliği	207	965	2250
Duralümin	72	124	107
Bakır	110	28	3.5
Kauçuk	0.0010	2.1	2140
Akrilik polimer	3.4	14	28

Tüm kalite kontrol ve standartlarla ilgili çalışmalarda dikkate alınan ve kullanılan, mühendislik gerilme-mühendislik birim şekil değişimi eğrisi ve değerleridir. Gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi değerleri ise, malzemelerin farklı gerilme koşulları altındaki davranışlarını tahmin etmede kullanılır.

Pekleşme Üsteli ( $n$ ) ve Mukavemet Katsayısı ( $K$ ):

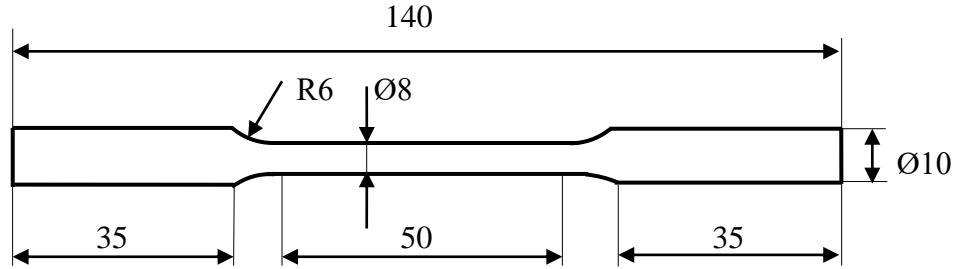
Gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinden elde edilebilecek iki önemli mekanik özellik, deformasyon sertleşmesi üssü ( $n$ ) ve mukavemet katsayısı ( $K$ ) değerleridir.

### 7.3.3 Çekme Çubuk Numunelerinin Standart Ölçüleri

Döküm işleminden sonra elde edilen parçalar; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B girilen Al-Cu alaşımlarının çeşidine göre sınıflandırılıp marka ile numaralandırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan 8 mm çapındaki çekme çubukları TS EN ISO 6892-1 standardına göre CNC tezgâhında işlenerek hazırlanmıştır. Çekme çubukların yüzeylerinde işleme izi ve çizik bırakılmamıştır. Çekme çubuk numuneleri ve bu çekme çubuklarının standart ölçüleri Şekil 7.18.'de görülmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 7.18 (a)** Bu çalışmada kullanılan alüminyum bakır alaşımından hazırlanan çekme çubuk numuneleri **(b)** TS EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanan çekme çubuk numunelerinin ölçüleri. (Ölçüler mm cinsinden verilmiştir.)

Çekme çubuk koparma cihazı; Konya Teknik Üniversitesi Makine Bölümü Makine Laboratuvarında, INSTRON 8801 marka, dynacell FORCE RATING modeli, 100 kN ve 207 bar (3000 psi) maksimum basınç değerine sahiptir. Çekme çubuk koparma deneyleri maksimum 60 tonluk çekme cihazında 1 mm/dakika hızında yapılmıştır. Şekil 7.19.'da INSTRON 8801 marka çekme çubuğu koparma cihazı görülmektedir.



**Şekil 7.19.** KTÜN Makine Mühendisliği Bölümündeki INSTRON 8801 marka çekme çubuğu koparma cihazı

#### **7.3.4 V-Charpy Çentik Darbe Testleri**

V-Charpy çentik darbe numuneleri freze cihazı ile standart ölçülerine işlenerek hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalografi Laboratuvarında rezistanslı fırında belirlenen parametrelere göre; 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C’de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yapay yaşlandırma T6 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. V-Charpy çentik darbe numunelerine, Konya Teknik Üniversitesi Metalürji Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarında V-Charpy çentik darbe kırma testleri uygulanmıştır. Çekiç ağırlığı 20,49 kg (300 joule) ve çekiç boyu 770 mm olan V-Charpy çentik darbe test cihazı Şekil 7.20.’de görülmektedir.

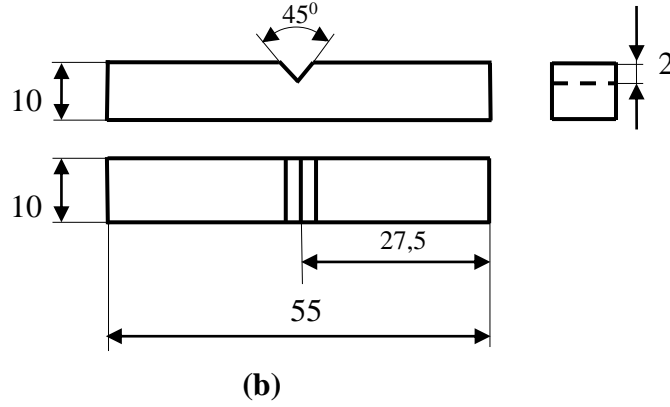


**Şekil 7.20** KTÜN Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarında V-Charpy çentik darbe test cihazı

Çentik darbe deneyinde, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B girilen Al-Cu alaşımlarına, 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C’de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numuneler kullanılmıştır. Bu V-Charpy çentik darbe numuneleri, darbe enerjilerinin belirlenmesiyle birbirleriyle mukayese edebilmek amacıyla hazırlanmıştır. V-Charpy çentik darbe numunelerinin standart ölçüleri TS EN ISO 148-1 Standardına göre Şekil 7.21.’de verilmiştir.



**(a)**



**Şekil 7.21.** (a) Bu çalışmada kullanılan alüminyum bakır alaşımından hazırlanan V-Charpy çentik darbe numuneleri (b) TS EN ISO 148-1V-Charpy çentik darbe deneyi Standart ölçüleri (Ölçüler mm cinsindedir.)

Sünek-gevrek geçişi, absorbe edilen darbe enerjisi üzerinde sıcaklığın etkisiyle ilişkilidir. Yüksek sıcaklık değerlerinde kırılmanın sünek bir şekilde meydana gelmesi nedeniyle, absorbe ettiği enerji daha yüksektir. Sıcaklığın azalmasıyla darbe enerjisi oldukça dar bir sıcaklık aralığında birden bire düşmekte ve böylece bu sıcaklığın altında, absorbe edilen enerji küçük bir değerde sabit kalmaktadır. Bu durumda oluşan kırılma ise oldukça gevrek karakterdedir. Pek çok alaşım için sünek-gevrek geçişin meydana geldiği belirli bir sıcaklık aralığı mevcuttur (Kayral, S., 2014).

### 7.3.5 Aşınma Deneyi

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan yöntemlerden birisi de malzemeye aşınma deneyi uygulamaktır. Aşınma deneyinin amacı, birbirleri ile temas halindeki sürtünmeli eleman çiftlerinde oluşan aşınmayı incelemek ve aşınma miktarını hesaplayarak metalik malzemelerin aşınma özelliklerini belirlemektir. Farklı aşınma deneyleri olmakla birlikte biz bu çalışmada alüminyum alaşımlarına uygun olan aşınma deneyini uyguladık. Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B gibi üç farklı aşındırıcı girilen sonrasında 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C’de 18 saat yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan dört grup Al-%5Cu alaşımlarına, ASTM G99 standartlarına uygun aşınma deneyi uygulanmıştır.

Şekil 7.22.’de aşınma deneylerinin yapıldığı, 535°C’de 4 saat çözeltiye alınmış, 175°C’de 18 saat yaşlandırılmış dört farklı Al-%5Cu alaşımından hazırlanan aşınma

deney numuneleri görülmektedir. Şekil 7.23.'te Aşınma deneyinin yapıldığı test cihazı görülmektedir. Aşınma deneyinde 10 newton, 20 newton ve 40 newton gibi üç farklı yük ayrı ayrı uygulanarak deneyler yapılmıştır. Dört farklı alaşım grubu için her birine üç farklı yük uygulanarak aşınma deneyi yapıldığından toplamda 12 adet numune kullanılmıştır. Aşınma mesafesi her bir numune için 3000 m sabit olarak uygulanmıştır. Aşınma deneyinin yapıldığı diskin her iki yüzeyi deneyden önce taşlanmıştır. Aşınma deneyinde kullandığımız numunelerin yüzeyleri önce 800 mesh sonra 1000 mesh ile zımparalanmış ve parlatılmıştır. Aşınma ile numunelerdeki kütle kaybını belirlemek amacıyla aşınma deneyinden önce ve sonra tartılarak 3000 metre sabit mesafesindeki kütle kayıpları ( $\text{mg}/\text{mm}^2$ ) olarak tespit edilmiş ve tablo halinde gösterilmiştir. Daha sonra aşınma deneyi uygulanan numunelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Bu numunelerin SEM analizlerinde farklı bölgelerden X5000 ile X30 arasında değişen büyüklüklerde görüntü alınmış olup cihaza ait analiz şartları her bir fotoğrafın altındaki skalada verilmiştir. Ayrıca numunelere EDX nokta ve alan analizleri de yapılmıştır. ZEISS EVO LS 10 EVO10.11.29 marka/model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. EDX nokta ve alan analizleri ile numune yüzeyindeki elementlerin dağılımı seçilen alana göre ağırlıkça % olarak elde edilmiştir. Yüksek voltajda ve yüksek pA uygulanarak X-ışınları konsantrasyonu ile numunenin 200 nm yüzeyinden soğurma yapılarak sonuçlar alınmıştır.



Şekil 7.22. Aşınma deneylerinin yapıldığı 18 saat yaşlandırılmış dört farklı alaşım numuneleri



Şekil 7.23. Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekanik Laboratuvarında aşınma deneyinin yapıldığı Aşınma Test Cihazı

## 7.4 DALDIRMALI KOROZYON DENEYİ

Korozyon, birbiriyle temas halinde olan malzemelerin birbirleri ile veya buldukları ortamla reaksiyona girmesi sonucu meydana gelir. Korozyon, malzemelerin hem fiziksel ve mekanik özelliklerinde hem de kimyasal özelliklerinde değişikliklere sebep olan bir olaydır. Korozyon, bu reaksiyonun gerçekleşme ortamına bağlı olarak ikiye ayrılır. Bu korozyon türleri; kimyasal korozyon ve elektrokimyasal korozyon olarak nitelendirilir. Kimyasal korozyon gaz ortamında meydana gelir, elektrokimyasal korozyon ise daha ziyade sulu ortamlarda gerçekleşen korozyon çeşididir. Ortamın pH değeri, sistemde bulunan gerilmeler, kullanılan malzemenin özellikleri ve kimyasal koşullar korozyon oluşumunda önemli parametrelerdir. (Doruk, 1982).

Metaller doğada genellikle bileşik halde bulunurlar. Bu sebeple metaller sürekli olarak kararlı yapı oluşturma eğilimindedirler. Metaller fazla enerjilerini boşaltarak tekrar kararlı bir bileşik haline dönmeye çalışırlar. Böylece bir korozyon ortamının oluşması için; elektrolitik sıvı, oksijen ve bir de metal malzeme olması gerekir. Korozyonun gerçekleşme mekanizması Şekil 7.24'te görülmektedir.



Şekil 7.24 Korozyonun temel mekanizması

Metalik malzemelerdeki korozyon, bozunma ve elektron kaybı şeklinde gerçekleşmektedir. Genel olarak korozyon sistemlerinde, bu elektron hareketlerinin gerçekleştiği anot, katot ve elektrolitik sıvı ortam bulunmaktadır. Korozyon sisteminde elektron kaybının görüldüğü metal parça anot olarak nitelendirilir. Anotta elektron kaybı olduğu için yükseltgenme reaksiyonu meydana gelir. Bu korozyon sisteminde



elektron alan parça da katot olarak isimlendirilir ve burada da indirgenme reaksiyonu gerçekleşir. (Nüumberger, 1995).

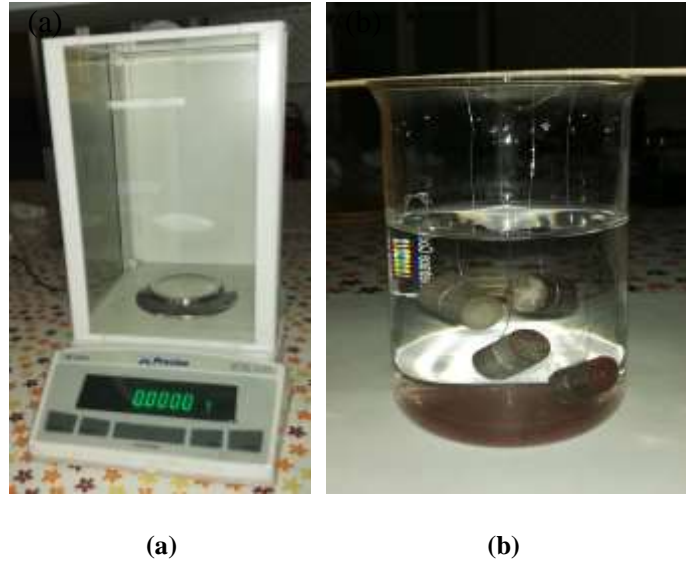
Alüminyum alaşımına bakır ilavesiyle mekanik özelliklerde bir artış olmakla birlikte korozyon direncinde azalmaya sebep olmaktadır. Alüminyum içerisindeki bakır ilave oranının artmasıyla, alüminyum alaşımının korozyon direncinde azalma görüldüğü tespit edilmiştir. (Çatar, 2017).

Daldırmalı korozyon deneyi için dört farklı alaşım seçilmiştir. Bunlar aşılmalı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılmalı eklenen Al-%5 Cu alaşımalarıdır. Bu dört grup alaşım numunelerine 535<sup>0</sup>C’de 4 saat çözeltiye alma, 25<sup>0</sup>C’de suda su verme, 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırma uygulanmıştır. Daldırmalı korozyon deneyi için; 300 g distile su, %3,5 NaCl ve %1 HCl (%37’lik konsantrasyon) asidik çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti içerisindeki numuneler 27<sup>0</sup>C sıcaklıkta 590 saat bekletilerek daldırmalı korozyon deneyi uygulanmıştır. Daldırmalı korozyon sonucundaki kütle kayıpları ppm (milyonda bir) oranında ölçüm yapan hassas terazi ile ölçülmüştür. Korozyona uğrayan numunelerdeki kütle kayıpları miligram (mg) cinsinden hesaplanmıştır. Daldırmalı korozyona maruz kalan numunelerin yüzey alanları mm<sup>2</sup> cinsinden hesaplanmıştır. Numunelerin yüzey alanları hesaplanarak, birim yüzeydeki kütle kayıpları mg/mm<sup>2</sup> olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 7.25’te daldırmalı korozyon deneyinde kullanılan numunelerin deneyden önceki ve deneyden sonraki görüntüleri görülmektedir. Bu numuneler tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşılmalı Al-Cu alaşımına ait numunelerdir. Şekil 7.26.a’da daldırmalı korozyon deneyinde numunelerdeki kütle kaybını ppm oranında ölçmek için kullanılan hassas terazi ve Şekil 7.26.b’de daldırmalı korozyon deneyinde %95,5 saf su, %3,5 NaCl, %1 HCl çözeltisi içerisinde daldırmalı korozyona maruz bırakılan numuneler görülmektedir.



**Şekil 7.25** Daldırmalı korozyon deneyinde kullanılan numuneler (a) Korozyondan önceki numuneler (b) 25<sup>0</sup>C sıcaklıkta 590 saat korozyona maruz kalan numuneler



**Şekil 7.26 (a)** Daldırmalı korozyon deneyinde numunelerdeki kütle kaybını ppm oranında (milyonda bir) ölçmek için kullanılan hassas terazi **(b)** Daldırmalı korozyon deneyinde %95,5 saf su, %3,5 NaCl, %1 HCl çözeltisi içerisinde daldırmalı korozyona maruz bırakılan numuneler ve deney kabı.

#### 7.4.1 Daldırmalı Korozyon SEM İncelemeleri

25<sup>0</sup>C sıcaklıkta 590 saat daldırmalı korozyona maruz kalan 4 farklı Al-Cu alaşım numunelerinin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Selçuk Üniversitesi Selçuk İtek Laboratuvarında SEM ve EDX mapping incelemeleri yapılmıştır. SEM incelemeleri; Zeiss EVO LS10 SE DETEKTÖR ile ve EDX incelemeleri; Bruker 1.23 eV EDX detektör cihazlarıyla yapılmıştır. SEM analizlerinde farklı bölgelerden X30 - X1000 arasında değişen büyüklüklerde görüntü alınmıştır.

SEM ile yüksek vakumda yüksek çözünürlükte numune yüzeyleri görüntülenerek karakterize edilmiştir. Cihazın çalışması için kullanılan, WD, EHT, pA ve SE Detektör parametreleri her numuneye göre değişiklik arz eder. EDX nokta veya alan analizi ile numune yüzeyindeki element dağılımları seçilen alana göre % olarak elde edilmiştir. Yüksek voltajda ve yüksek pA uygulanarak X ışınları konsantrasyonu artırılır. Numunelerin yüzeyinden 200 nm derinlikte soğurma yapılmıştır.

EDX Haritalama (Mapping) analizleri ile numunelerin seçilen alandaki elementlerin dağılımları ağırlıkça ve atomik yüzde olarak verilmiştir. Bu yöntem ile numune yüzeyindeki belli bir alan seçilir ve bu alandaki elementlere renk ataması yapılır. Alınan görüntüler renkli olarak resmedilir. Bu renkler sayesinde atanan element ve bileşiklerin hangi bölgelerde olduğu açıkça görülebilmektedir.

#### 7.4.2 Daldırmalı Korozyon Yüzeyaltı (Subsurface) İncelemeleri

Daldırmalı korozyon yüzeyaltı (subsurface) incelemeleri için dört farklı Al-Cu alaşım numuneleri seçilmiştir. Bunlar aşıl原因ıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşıl原因ıcıları eklenen Al-%5Cu alaşımalarıdır. Bu dört grup alaşım numunelerine 535<sup>0</sup>C'de 4 saat çözeltiye alma, 25<sup>0</sup>C'de suda su verme, 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırma uygulanmıştır. Daldırmalı korozyon deneyi için; 300 g distile su, %3.5 NaCl ve %1 HCl (%37'lik konsantrasyon) asidik çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti içerisindeki numuneler 25<sup>0</sup>C sıcaklıkta 590 saat bekletilerek daldırmalı korozyon deneyi uygulanmıştır. 10 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde olan bu numuneler, alt yüzeyden 3 mm yükseklikte soğuk kesme ile kesilmişlerdir. Daha sonra sırasıyla; 240, 320, 600, 800, 1000 ve 2500 mesh nolu zımparalar ile yüzeyleri temizlenip 1 mikronluk elmas pasta ile parlatılmıştır. Bu numuneler keller dağlayıcı ile 10-15 saniye dağlanmışlardır.

Hazırlanan bu numuneler optik mikroskop ile X50, X100, X200 ve X500 gibi dört farklı büyütme oranlarında incelenmiş ve fotoğrafları alınmıştır. Mikro yapı incelemeleri; Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalografi Laboratuvarında, Nikon ECLIPSE MA 100 marka metal mikroskobu ile yapılmıştır. KOZO marka TCA-300A model mikroskop kamerası ile fotoğraf görüntüleri bilgisayara aktararak, 100 µm ölçekteki bu mikro yapı fotoğrafları bilgisayardan alınmıştır.

## 8. DENEY SONUÇLARI

### 8.1. A206.0 Alaşımının Kimyasal Bileşimi

A206.0 Al-%5Cu alaşımının bileşiminde belli değerlerde bulunan Mn ve Mg elementleri, alaşımın mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler. Alüminyum bakır alaşımlarında istenilen sertlik ve mukavemet özelliklerini elde etmek için ağırlıkça yüzde mangan oranının %0,25Mn'dan az olmaması gerekir. Demir oranı ağırlıkça %0,10Fe oranında olduğunda, sertlik ve mukavemet özelliklerine katkıda bulunur fakat ağırlıkça %0,20 Fe oranından fazla olduğunda kırılabilirliğe sebep olur. Bu sebeple Al-Cu alaşımında ağırlıkça %0,20Fe'den fazla olması istenmez.

**Çizelge 8.1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan; A206.0 alüminyum bakır alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılamaçılarının %0,6 oranında girilmiş olduğu A206.0 alaşımlarının ağırlıkça yüzde kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Alaşım	%Al	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%B	%Ti	%Sr
A206.0	94,329	0,200	0,200	5,090	0,437	0,175	0,001	0,000	0,006	0,000
A206.0+AlSr10	94,776	0,320	0,180	4,570	0,573	0,000	0,005	0,004	0,000	0,150
A206.0+Al3Ti1B	93,698	0,530	0,180	5,430	0,963	0,101	0,005	0,012	0,049	0,000
A206.0+Al5Ti1B	93,851	0,230	0,180	5,470	0,448	0,199	0,005	0,013	0,057	0,000

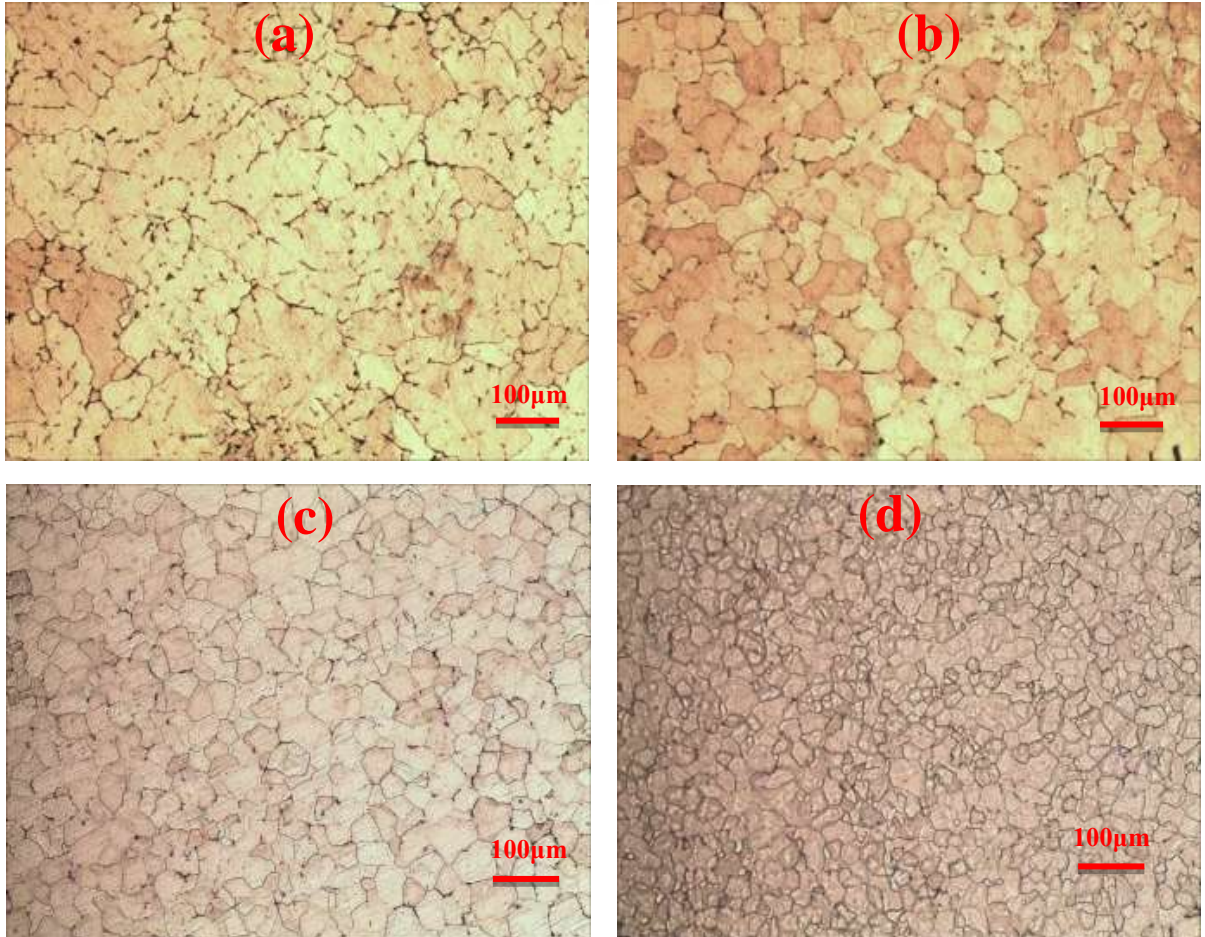
### 8.2. Mikro Yapı Sonuçları

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B gibi üç farklı aşılamaçısı girilen, sonrasında 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de su verme, 175°C'de 18 saat yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan dört grup Al-%5Cu alaşımlarının X100 büyütmede 100 µm ölçekli mikro yapı fotoğraf görüntüleri Şekil 8.1'de görülmektedir. Şekil 8.1.a' aşılamaçısı girilmeyen Al-Cu alaşımında dentritik bir mikro yapı görülmektedir. Tane sınırları belirgindir fakat eş eksenli taneler henüz tamamıyla teşekkül etmemişlerdir. Şekil 8.1.b-d'de ise aşılamaçılarının girildiği Al-Cu alaşımlarının mikro yapıları tamamen eş eksenli tane yapılarından oluşmuştur. Bu çalışmada tane inceltmede en etkili aşılamaçısının Al5Ti1B mastır alaşımı olduğu

görülmektedir. Tane inceltici girilmeyen ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B gibi üç farklı aşılavıcı girilen Al-%5Cu alaşımlarının, 18 saat yaşlandırma sonucunda; ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 98  $\mu\text{m}$ , 76  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$ , 38  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu, tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımına göre belirgin bir şekilde düzelmiş ve incelmıştır. (Şekil 8.1.a ve Şekil 8.1.b). Fakat AlSr10'un tane boyutu inceltme etkisi, Al-Ti-B tane inceltici girilmiş alaşımların seviyesinde değildir. Ti ve B elementleri tane inceltme işleminde Sr elementinden daha etkilidir.

Şekil 8.1.(c)'de Al3Ti1B alaşımının tane boyutu inceltme etkisinin, AlSr10'dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat Al3Ti1B'un tane inceltme etkisi, Al5Ti1B alaşımının seviyesinde değildir. Şekil 8.1.(d) ise tane boyutu inceltme etkisinin en fazla Al5Ti1B tane inceltici ile elde edildiğini göstermektedir. Ti ve B elementleri tane inceltmede birbirlerini desteklemektedirler.

Al5Ti1B ve Al3Ti1B alaşımları birbiriyle karşılaştırıldığında B elementinin oranları eşit olmakla beraber, Al5Ti1B'un tane inceltme etkisi daha yüksektir. Böylece Al-Cu alaşımına ilave edilen Ti elementi oranının artmasıyla, tane inceltme etkisi artış göstermiştir (Şekil 8.1.d).



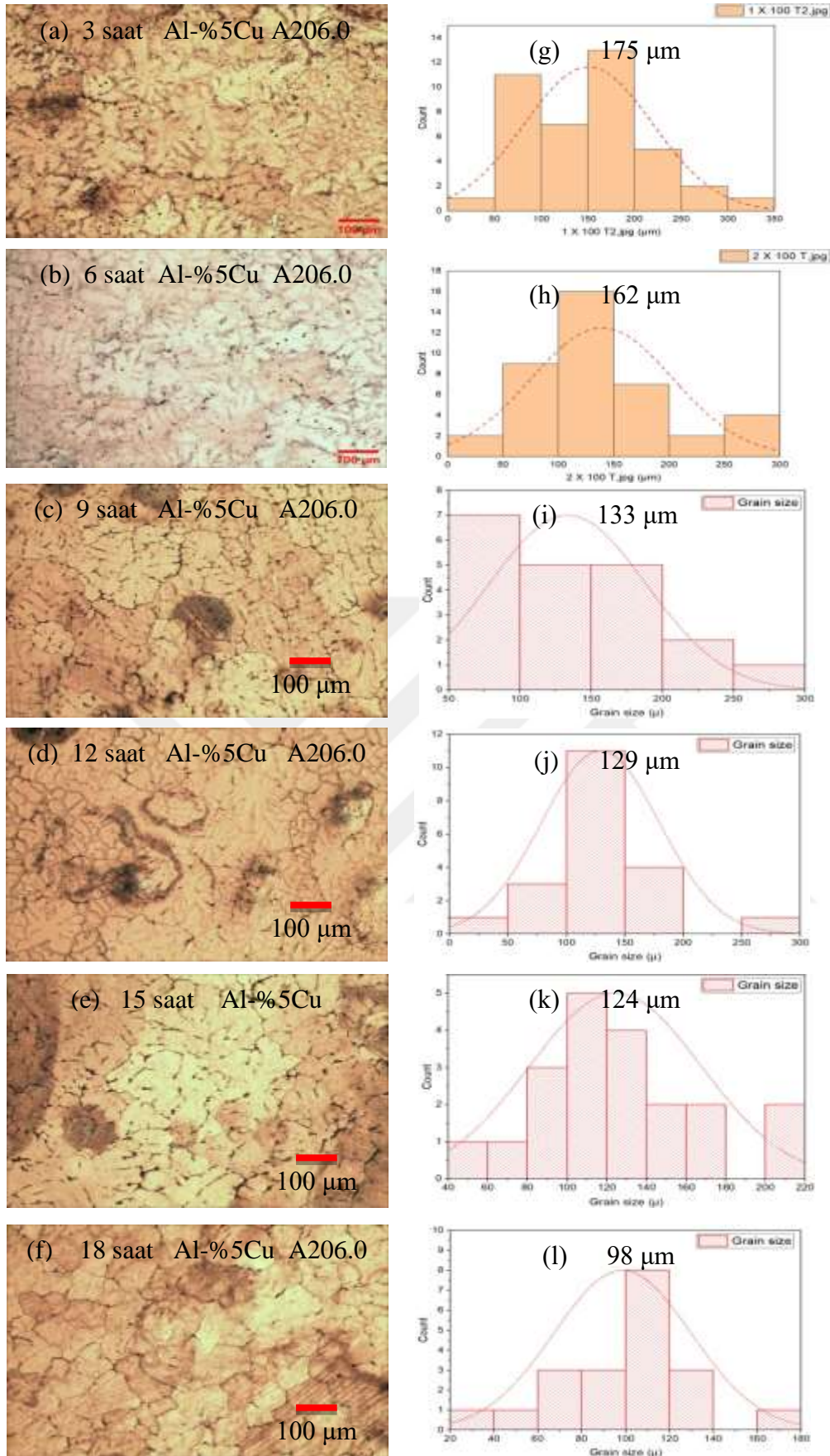
**Şekil 8.1.** Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B gibi üç farklı tane incelticilerin ağırlıkça %0.6 oranında girildiği; 535°C'de çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C'de 18 saat yaşlandırma uygulanan Al-%5Cu alaşımlarının, X100 büyütmedeki optik mikroskop ile elde edilen mikro yapı görüntüleri. (a) Tane inceltici girilmemiş Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu 98 µm' dir. (b) AlSr10 aşılama girilmiş Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu 76 µm' dir. (c) Al-3Ti-1B aşılama girilmiş Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu 53 µm' dir. (d) Al-5Ti-1B aşılama girilmiş Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu 38 µm' dir.

### 8.3. Tane Boyutu Analiz Sonuçları

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B gibi üç farklı tane inceltici girilerek elde edilen Al-Cu alaşım numunelerine, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu dört grup Al-%5Cu alaşımlarının X100 büyütmede 100 µm ölçekli optik mikroskop fotoğraflarından ortalama tane boyutlarının ölçümleri için Image J Analiz programı kullanılmıştır. Image J Analiz yönteminde; 60 mm yüksekliğinde ve 80 mm uzunluğundaki resim çerçevesi ölçek olarak alınmıştır. Bu yöntemde  $\text{in}^2$  olarak birim alandaki tanelerin kaç mikron büyüklüğünde ve kaç adet olduğu program tarafından hesaplanıp analiz edilerek ortalama tane boyutu değerleri grafik olarak verilmiştir.

Şekil 8.2.'de tane inceltici girilmemiş Al-Cu alaşımının; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı yaşlandırma sürelerinden sonraki mikro yapı resimleri ve ortalama tane boyutu değerleri görülmektedir. Şekil 8.2.(a-f)'de X100 büyütmedeki mikro yapı görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.2.(g-l)'de her bir farklı yaşlandırma sürelerindeki ortalama tane boyutu analiz değerleri verilmiştir. Buna göre mikro yapıdaki tane boyutlarını dentritik kaba bir yapı olarak niteleyebiliriz. İmaj analizinden  $\text{in}^2$  birim alandaki tanelerin kaç µm boyutunda kaç tane olduğu görülebilmektedir ve ortalama tane boyutu değerleri resimlerin üzerinde verilmiştir. Buna göre tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımının 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat yaşlandırılması sonunda elde edilen ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 175 µm, 162 µm, 133 µm, 129 µm, 124 µm ve 98 µm olarak elde edilmiştir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla ortalama tane boyutu değerleri ters orantılı olarak azalmaktadır. 3 saat yaşlandırılan numunenin ortalama tane boyutu 175 µm iken 18 saat yaşlandırma sonucunda bu değer 98 µm değerine düşerek önemli oranda tane boyutu küçülmüştür. Al-Cu alaşımının 18 saat yaşlandırılması sonunda ortalama tane boyutu değerinde % 44 oranında tane boyutu inceltme etkisi görülmüştür.





**Şekil 8.2.** Tane inceltici girilmemiş Al-%5Cu alaşımının; 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı yaşlandırma sürelerinden sonraki mikro yapı görüntüleri ve ortalama tane boyutu grafikleri görülmektedir. (a – f) X100 büyütmedeki mikro yapı görüntüleri (g - l) Altı farklı sürede yaşlandırılan Al-Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri.

Şekil 8.3.'te AlSr10 tane inceltici girilmiş Al-Cu alaşımının; 535°C'de 4 saat çözeltiliye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı yaşlandırma sürelerinden sonraki mikro yapı resimleri ve ortalama tane boyutu değerleri görülmektedir. Şekil 8.3.(a-f)'de X100 büyütmedeki mikro yapı görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.3.(g-l)'de her bir farklı yaşlandırma sürelerindeki ortalama tane boyutu analiz değerleri görülmektedir. Şekil 8.3'te mikro yapı morfolojisinde tane boyutlarını kaba olarak ifade edebiliriz. Eş eksenli taneler henüz belirgin değildir. Şekil 8.3.a-b'de eş eksenli olmayan dentritik yapı mevcuttur. Şekil 8.3.c-f'deki mikro yapı görüntülerinde dentritik yapının eş eksenli yapıya dönüşmeye başladığı görülmektedir.

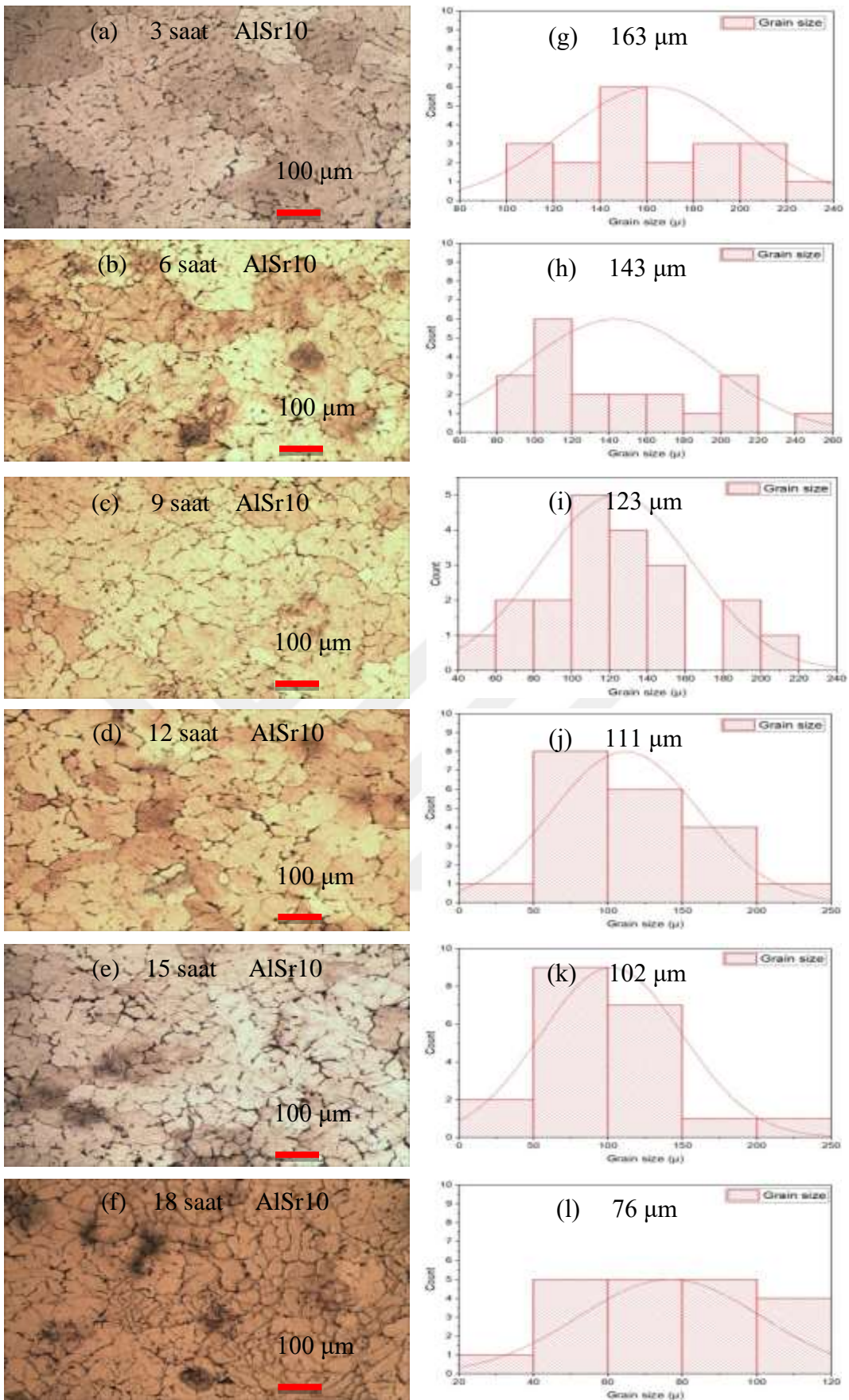
İmaj analizinden  $\text{in}^2$  birim alandaki tanelerin kaç  $\mu\text{m}$  boyutunda kaç tane olduğu görülebilmektedir ve ortalama tane boyutları resimlerin üzerlerinde verilmiştir. AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat yaşlandırma sonunda elde edilen ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 163  $\mu\text{m}$ , 143  $\mu\text{m}$ , 123  $\mu\text{m}$ , 111  $\mu\text{m}$ , 102  $\mu\text{m}$  ve 76  $\mu\text{m}$ ' dir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla ortalama tane boyutu değerleri ters orantılı olarak azalmaktadır. 3 saat yaşlandırılan numunenin ortalama tane boyutu 163  $\mu\text{m}$  iken 18 saat yaşlandırma sonucunda bu değer 76  $\mu\text{m}$  değerine düşerek önemli oranda tane boyutu küçülmüştür. AlSr10 aşılavıcısı girilen Al-Cu alaşımının 18 saat yaşlandırılması sonunda ortalama tane boyutu değerinde % 54 oranında tane boyutu inceltme etkisi görülmüştür.

Şekil 8.4.'te Al3Ti1B tane inceltici girilmiş Al-%5Cu alaşımının; 535°C'de 4 saat çözeltiliye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı yaşlandırma sürelerinden sonraki mikro yapı resimleri ve ortalama tane boyutu değerleri görülmektedir. Şekil 8.4.(a-f)'de X100 büyütmedeki mikro yapı görüntüleri ve Şekil 8.4.(g-l)'de her bir farklı yaşlandırma sürelerindeki ortalama tane boyutu değerleri görülmektedir. Şekil 8.4.a'daki mikro yapıları incelediğimizde, 3 saat yaşlanma sonunda teşekkül eden taneleri tam eş eksenli olarak niteleyemeyiz. Fakat 6 saat yaşlanmadan sonra taneler ve tane sınırları çok net olarak görülmektedir. Taneler eş eksenli bir yapıya sahiptir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla tane boyutları da küçülmektedir. Al3Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat yaşlandırma sonunda elde edilen ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 91  $\mu\text{m}$ , 86  $\mu\text{m}$ , 81  $\mu\text{m}$ , 73  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$  ve 53  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. Yaşlandırma süresinin artmasıyla ortalama tane boyutu değerleri ters orantılı olarak azalmaktadır. 3 saat yaşlandırılan numunenin ortalama tane boyutu 91  $\mu\text{m}$  iken 18 saat yaşlandırma sonucunda bu değer 53  $\mu\text{m}$  değerine düşerek önemli oranda tane boyutu küçülmüştür.

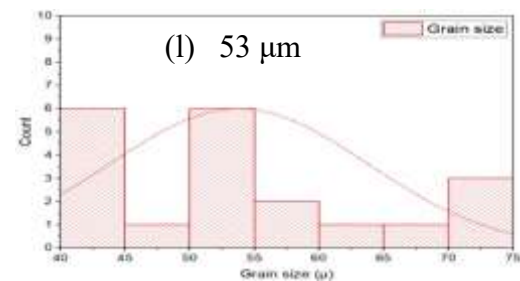
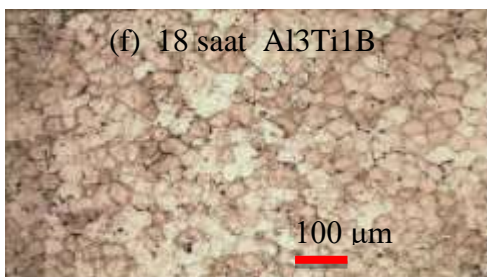
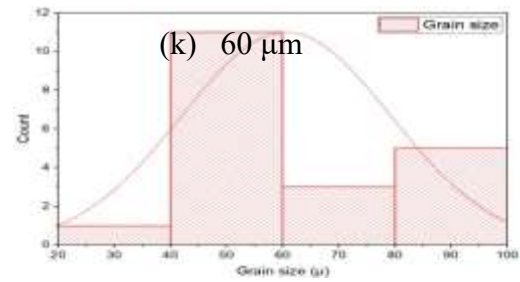
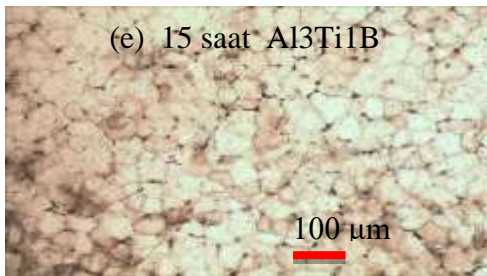
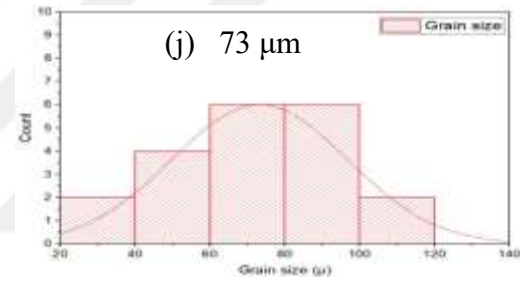
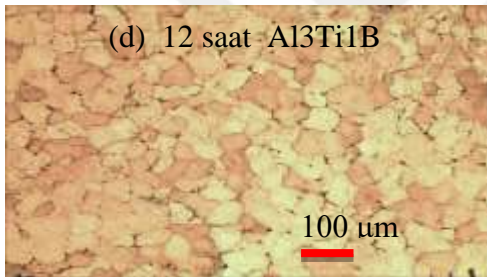
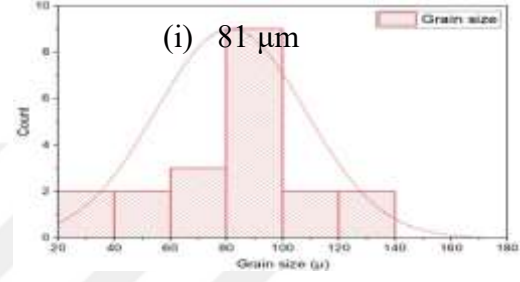
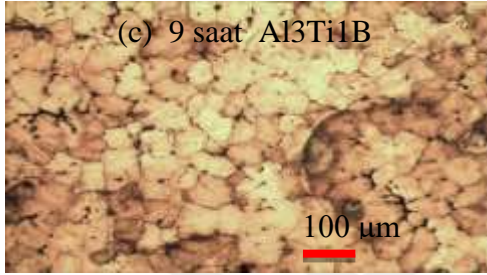
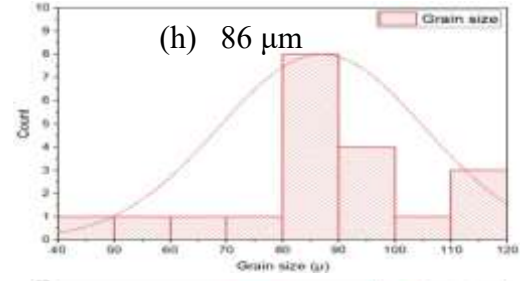
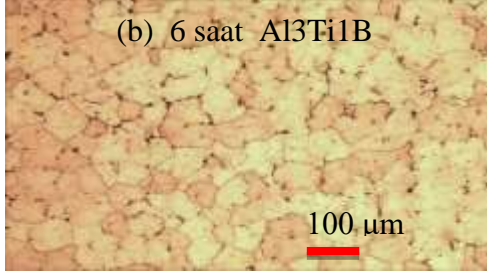
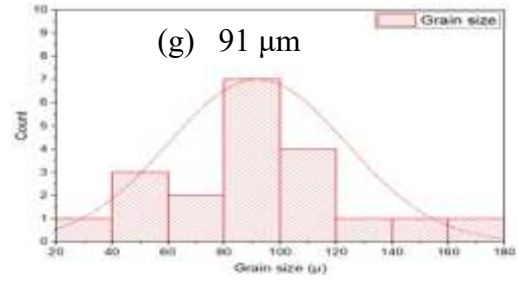
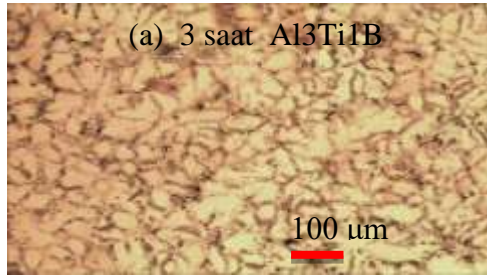


Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılایıcı girilen Al-Cu alaşımasının 18 saat yaşlandırılması sonunda ortalama tane boyutu değerinde % 42 oranında tane boyutu inceltme etkisi görülmüştür.

Şekil 8.5'te Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilmiş Al-%5Cu alaşımasının; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı yaşlandırma süreleri sonucundaki mikro yapı resimleri ve ortalama tane boyutu değerleri görülmektedir. Şekil 8.5.(a-f)'de X100 büyütmedeki mikro yapı görüntüleri ve Şekil 8.5.(g-l)'de her bir farklı yaşlandırma sürelerindeki ortalama tane boyutu değerleri görülmektedir. Şekil 8.5'te mikro yapılarda tamamıyla teşekkül etmiş olan eş eksenli taneler görülmektedir. Taneler ve tane sınırları çok net olarak belirgin bir şekildedir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla tane boyutları da küçülmektedir. Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat yaşlandırma sonunda elde edilen ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 51 µm, 48 µm, 46 µm, 44 µm, 41 µm ve 38 µm olarak elde edilmiştir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla ortalama tane boyutu değerleri ters orantılı olarak azalmaktadır. 3 saat yaşlandırılan numunenin ortalama tane boyutu 51 µm iken 18 saat yaşlandırma sonucunda bu değer 38 µm değerine düşerek önemli oranda tane boyutu küçülmüştür. Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılایıcı girilen Al-Cu alaşımasının 18 saat yaşlandırılması sonunda ortalama tane boyutu değerinde % 26 oranında tane boyutu inceltme etkisi görülmüştür.

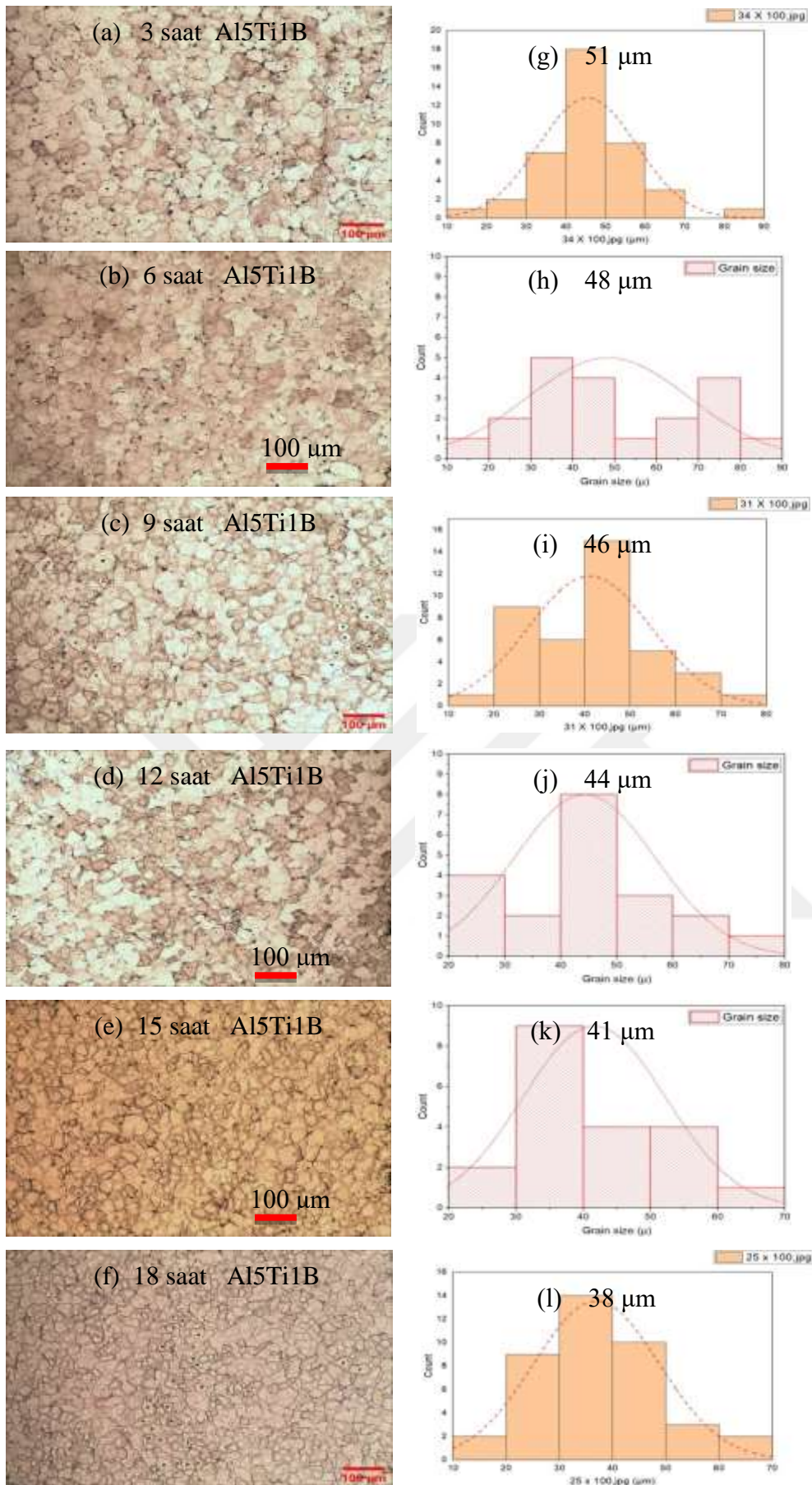


**Şekil 8.3.** AlSr10 Tane inceltici girilmiş Al-%5Cu alaşımının; 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı yaşlandırma sürelerinden sonraki mikro yapı resimleri ve ortalama tane boyutu değerleri. (a – f) X100 büyütmedeki mikro yapı görüntüleri (g - l) Farklı sürelerde yaşlandırılan Al-Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri.



**Şekil 8.4.** Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B Tane inceltici girilmiş Al-%5Cu alaşımının; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı yaşlandırma sürelerinden sonraki mikro yapı resimleri ve ortalama tane boyutu değerleri. (a – f) X100 büyütmedeki mikro yapı görüntüleri. (g - l) Farklı sürelerde yaşlandırılan Al-Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri.



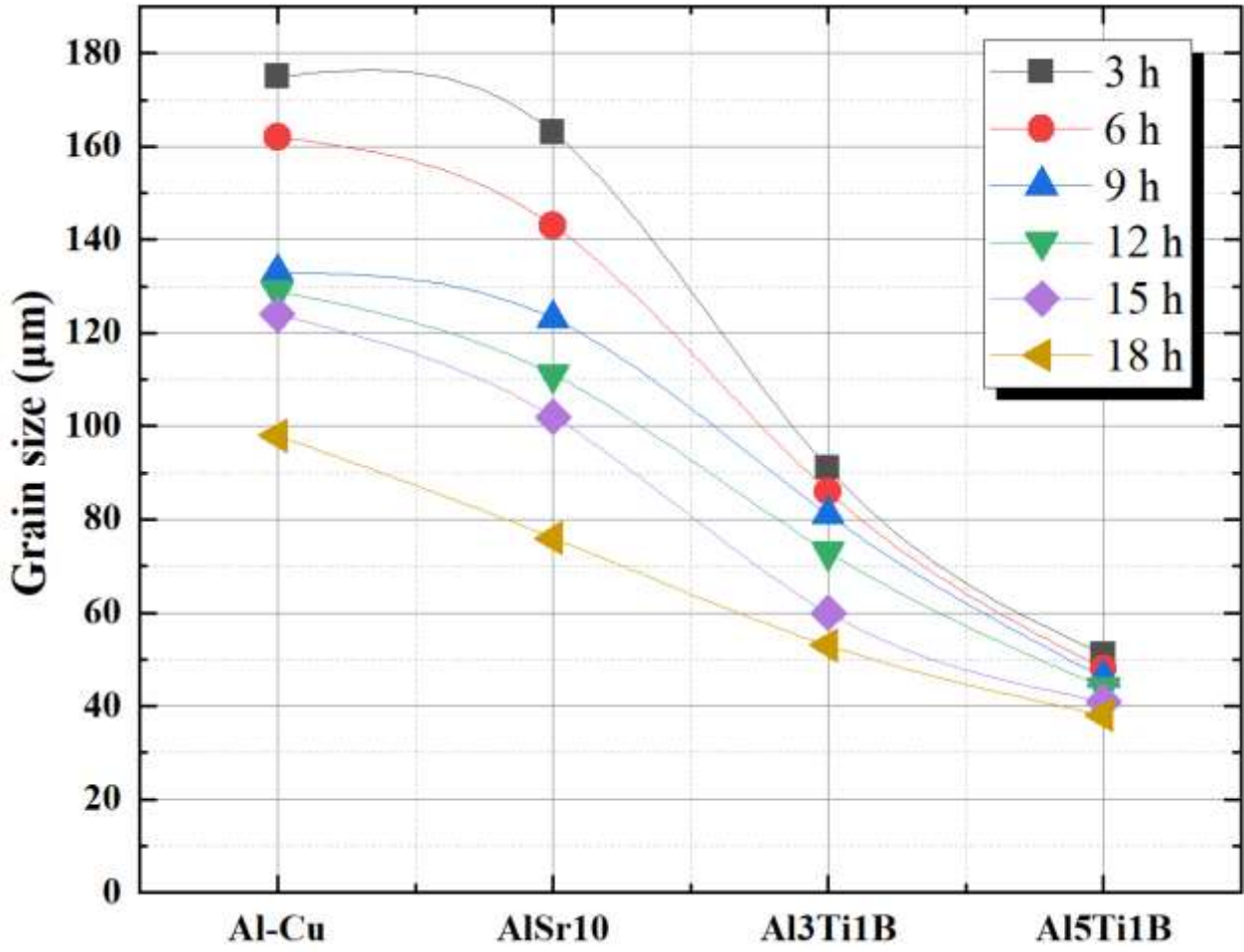


**Şekil 8.5.** Al5Ti1B Tane inceltici girilmiş Al-%5Cu alaşımının; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı yaşlandırma sürelerinden sonraki mikro yapı resimleri ve ortalama tane boyutu değerleri. (a – f) X100 büyütmedeki mikro yapı görüntüleri (g - l) Farklı sürelerde yaşlandırılan Al-Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri.

Şekil 8.6'da tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B gibi üç farklı aşılama yapılmış Al-Cu alaşımlarının, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırıldıktan sonraki ortalama tane boyutu değerleri görülmektedir. Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımlarının 175°C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırılması ile 175 µm ortalama tane boyutu elde edilmiştir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla ortalama tane boyutu azalarak 18 saat yaşlandırmada ortalama tane boyutu 98 µm değerine düşmüştür.

AlSr10 tane inceltici ile aşılama yapılan Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu, tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımına göre daha küçük tane boyutu değerleri elde edilmiştir. AlSr10 tane inceltici ilave edilen Al-%5Cu alaşımının 175°C'de 3 saat yaşlandırılması ile 163 µm olan ortalama tane boyutu yaşlandırma süresinin artmasıyla azalma göstererek 18 saat yaşlandırma süresinde 76 µm değerine düşme göstermiştir. Al3Ti1B ile aşılama yapılan Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu değerleri, AlSr10 ile aşılama yapılan Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu değerlerinden daha düşüktür. Dolayısıyla Ti ve B elementleri Sr elementine göre tane boyutu inceltmede daha etkindir.

Al3Ti1B tane inceltici ilave edilen Al-%5Cu alaşımının 175°C'de 3 saat yaşlandırılması ile 91 µm olan ortalama tane boyutu yaşlandırma süresinin artmasıyla azalma göstererek 18 saat yaşlandırma süresinde 53 µm değerine düşme göstermiştir. Yine aynı şekilde Al5Ti1B tane inceltici ilave edilen Al-%5Cu alaşımının 175°C'de 3 saat yaşlandırılması ile 51 µm olan ortalama tane boyutu yaşlandırma süresinin artmasıyla ters orantılı bir şekilde azalma göstererek 18 saat yaşlandırma süresinde 38 µm değeri elde edilmiştir. Böylece en fazla tane inceltmesi, Al5Ti1B tane inceltici mastır alaşım ile elde edilmiştir. Al5Ti1B aşılama yapılmış Al-%5Cu alaşımının B elementi oranları eşit olduğundan Ti elementinin tane inceltmede daha etkili olduğu bu çalışmada görülmektedir.

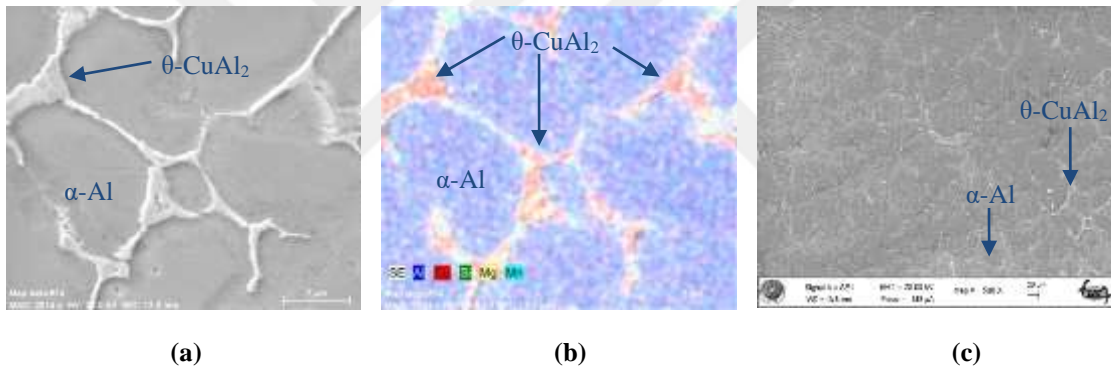


Şekil 8.6. Tane inceltici girilmeyen ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B gibi üç farklı aşılacağı girilmiş, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırılmış Al-%5Cu alaşımlarının; ortalama tane boyutu ölçümlerinin birbirleriyle karşılaştırılması

## 8.4. SEM ve EDS Analiz Sonuçları

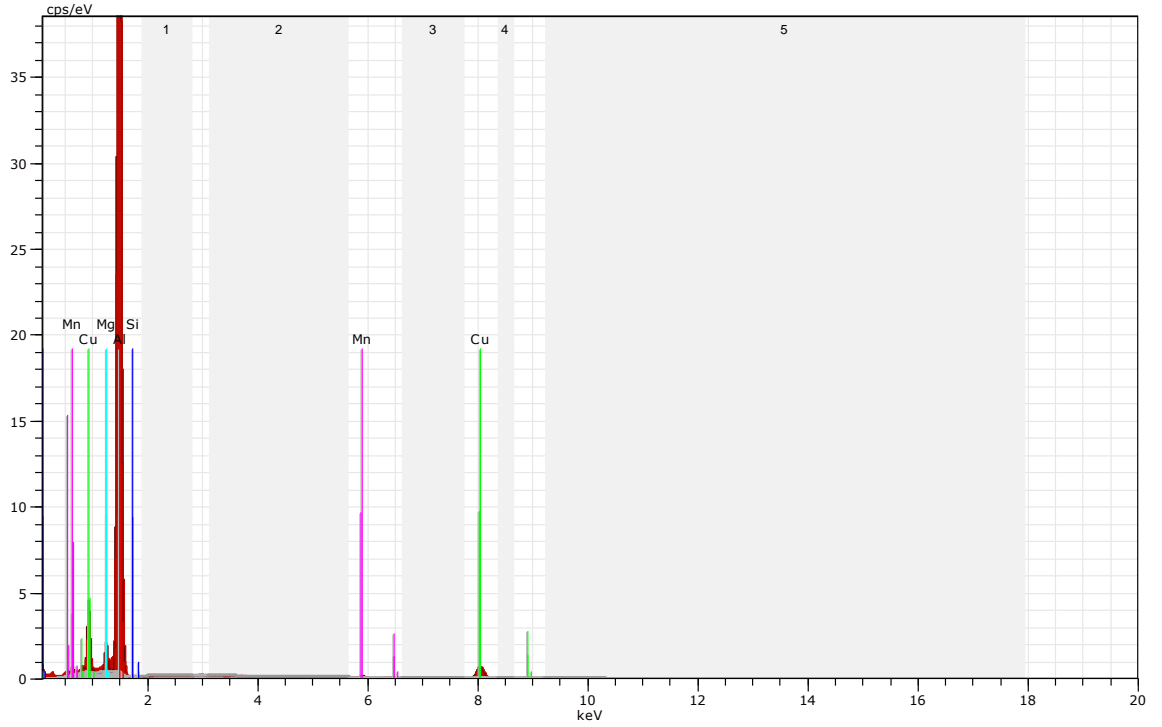
### 8.4.1. Tane İnceltici Girilmeyen Al-Cu Alaşımlarının SEM Analiz Sonuçları

535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma işlemi yapılmış, 25°C'de suda su verilmiş yaşlandırma yapılmamış olan Al-%5Cu alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 8.7.'de görülmektedir. Şekil 8.7.(a)'da gri renkli bölgeler  $\alpha$ -Al taneleri ve beyaz renkli bölgeler tane sınırları olmak üzere net bir şekilde görülmektedir. Şekil 8.7.(b)'de renklendirilmiş haritalama yöntemiyle aynı bölgeden alınan SEM görüntüsünde, alaşımın içerisinde bulunan Cu, Si, Mn ve Mg elementleri ve bunların renklendirilmiş dağılımları görülmektedir.  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği kırmızı renkli olarak tane sınırlarında biriktiği görülmektedir. Şekil 8.7.(c)'de X500 büyütmede  $\alpha$ -Al taneleri ve tane sınırlarındaki  $\theta$ -CuAl<sub>2</sub> bileşikleri görülmektedir.



**Şekil 8.7.** 535°C'de 4 saat çözeltiye alma işlemi uygulanmış, 25°C'de suda su verilmiş, yaşlandırılmamış ve tane inceltici girilmemiş Al-%5Cu alaşımının SEM görüntüleri. **(a)** X2014 büyütmedeki SEM görüntüsü. Gri renkli matris  $\alpha$ -Al taneleri ve beyaz gri renkte tane sınırları. **(b)** X2014 büyütmede renklendirilmiş haritalama SEM görüntüsü. Kırmızı renkle gösterilen  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiğinin tane sınırlarında yoğunlaştığı görülmektedir. **(c)** X500 büyütmede eş eksenli yapıdaki koyu gri renkli  $\alpha$ -Al taneleri ve beyaz renkli tane sınırlarında  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşikleri görülmektedir.

Şekil 8.8.(a)'da EDX analizine göre Al-%5Cu alaşımının seçilen bölgesinde bulunan elementlerin pikleri görülmektedir. Buna göre Al, Cu, Si, Mn ve Mg elementlerinin pikleri mevcuttur. Şekil 8.8.(b)'de elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Ağırlıkça %90,31 Al ve ağırlıkça %7,17 Cu mevcuttur. Atomik olarak %94,29 Al ve %3,18 Cu bulunmaktadır. Cu elementi başlıca  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği halinde tane sınırlarında görülmektedir.



(a)

## Spectrum: Haritalama

Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	105,59	90,31	94,29	5,1
Bakır	8,38	7,17	3,18	0,3
Silisyum	0,17	0,15	0,15	0,0
Magnezyum	2,10	1,80	2,09	0,1
Mangan	0,68	0,58	0,30	0,1
Total:	116,92	100,00	100,00	

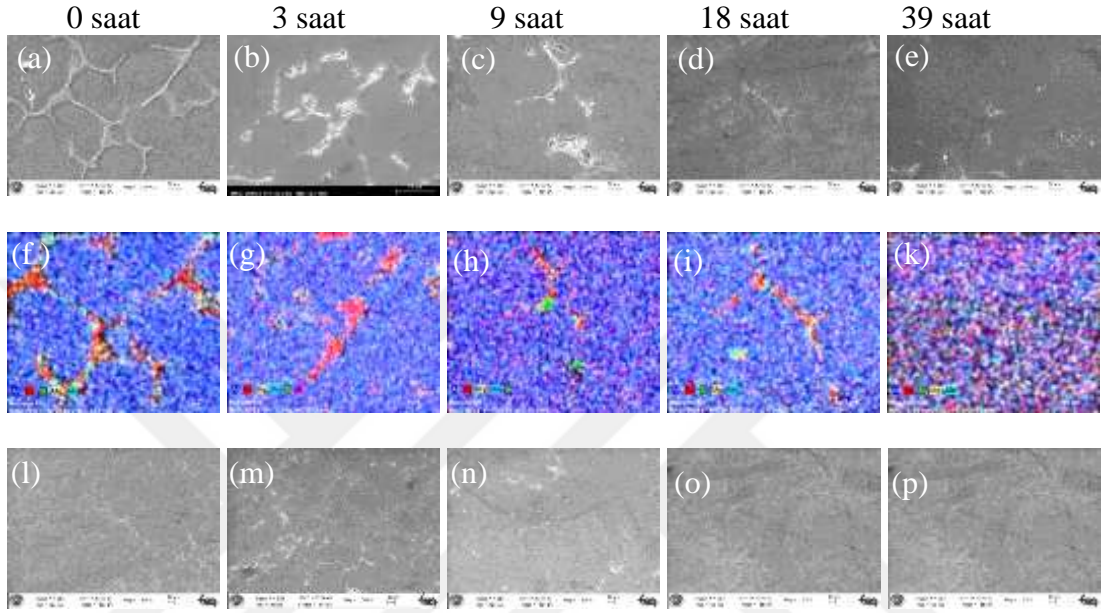
(b)

**Şekil 8.8.** Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaışımının EDX görüntüleri. (a) Al, Cu, Si, Mn ve Mg elementlerinin pikleri (b) Al-%5Cu alaışımında bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

Şekil 8.9.'da tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaışımına, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme işlemi uygulandıktan sonra, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı sürede yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Şekil 8.9.(a-e)'de X2000 büyütme ve 10 µm ölçekte, beş farklı numuneden alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.9.a'da tane sınırları çok belirgin bir haldedir. Daha sonra yaşlandırma süresinin artmasıyla tane sınırlarının dağıldığı görülmektedir. Şekil 8.9.(f-k)'da aynı numunelerin renklendirilmiş haritalama yöntemi ile mikro yapıda bulunan elementlerin ve bileşiklerin dağılımları renklendirilmiş olarak



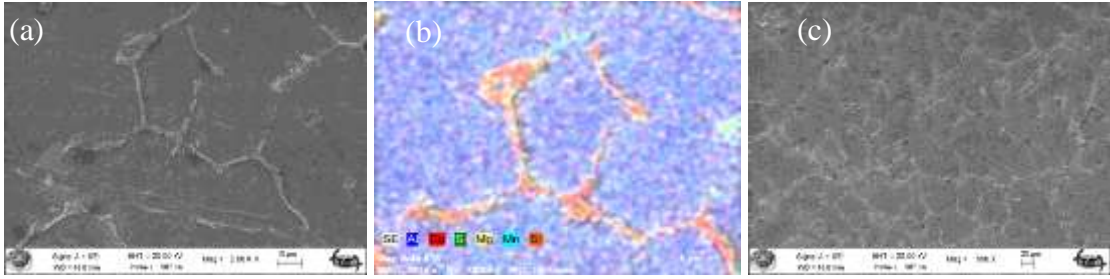
görülmektedir. İlk durumda kırmızı renkle gösterilen  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği tane sınırlarında iken 18 saat yaşlandırma sonucunda bunların difüzyon yoluyla tane içlerinde dağıldıkları görülmektedir. Şekil 8.9.(l-p) ile gösterilen resimler aynı numunelerden X500 büyütme ile alınmıştır. Bu resimlerde de yaşlandırma süresinin artmasıyla tane sınırlarının zamanla dağıldığı görülmektedir.



**Şekil 8.9.** Alaşımız Al-%5Cu alaşımının 175°C sıcaklıkta ve 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı yaşlandırma sürelerindeki SEM analizi görüntüleri. (a-e) X2000 büyütmedeki SEM görüntüleri (f-k) X2014 büyütmedeki renklendirilmiş haritalama alan analizi SEM görüntüleri (l-p) X500 büyütmedeki SEM görüntüleri

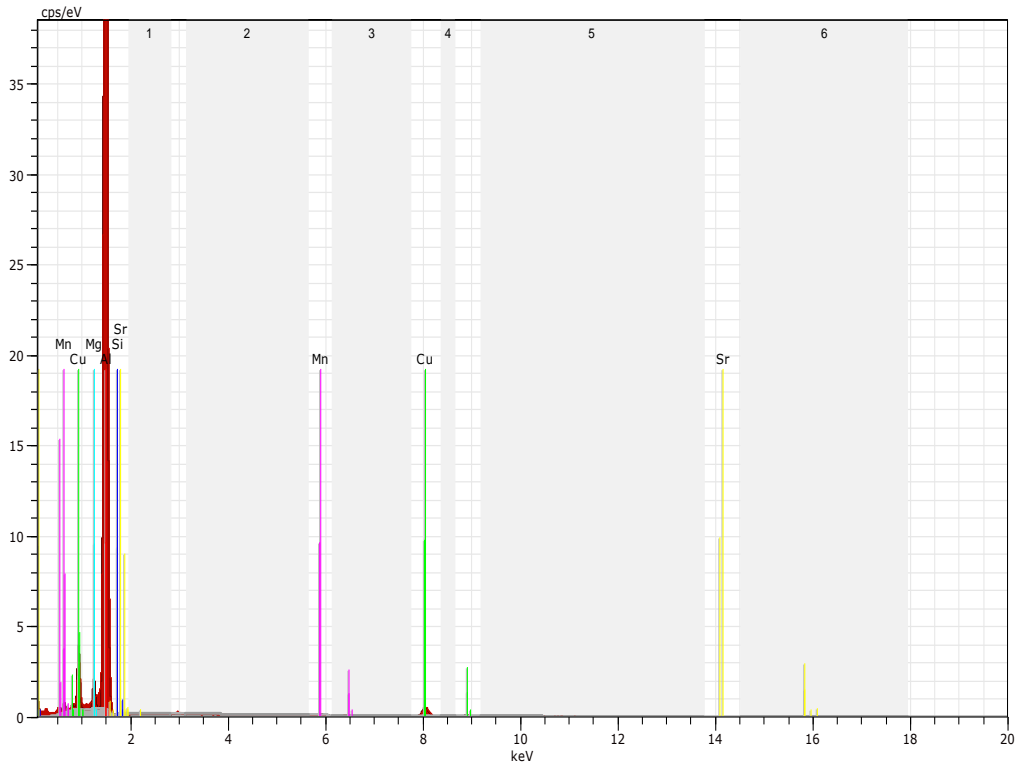
#### 8.4.2 AlSr10 Girilen Al-%5Cu Alaşımlarının SEM Analiz Sonuçları

AlSr10 tane inceltici mastır alaşım ilave edilmiş, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme işlemi yapılmış, yaşlandırma yapılmamış olan Al-%5Cu alaşımına alaşımın taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri Şekil 8.10'da görülmektedir. Şekil 8.10.(a)'da gri renkli  $\alpha$ -Al taneleri ve beyaz renkli tane sınırları çok net olarak görülmektedir. Şekil 8.10.(b)'de renklendirilmiş haritalama yöntemiyle aynı bölgeden alınan SEM görüntüsünde,  $\alpha$ -Al alaşımının içerisinde bulunan Cu, Si, Mn, Mg ve Sr elementleri ve bunların dağılımları görülmektedir.  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği kırmızı renkli olarak tane sınırlarında biriktiği görülmektedir. Aynı şekilde Sr elementi de Al<sub>4</sub>Sr ve AlSr intermetalik bileşik formunda tane içlerinde ve tane sınırlarında mevcut oldukları görülmektedir. Şekil 8.10.(c)'de X500 büyütmedeki SEM görüntüsünde tane sınırları oldukça belirgin bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 8.10.** 535°C'de 4 saat çözeltiye alma işlemi uygulanmış, yaşlandırılmamış olan Al-%5Cu alaşımına AlSr10 tane inceltici ilave edilen alaşımın taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri. (a) X2000 büyütmedeki SEM görüntüsü. Gri renkli  $\alpha$ -Al taneleri ve beyaz gri renkte tane sınırları (b) X2014 büyütmede renklendirilmiş haritalama SEM görüntüsü.  $\alpha$ -Al alaşımı içerisinde Cu, Si, Mn, Mg ve Sr elementlerinin dağılımı görülmektedir. (c) X500 büyütmede SEM görüntüsündeki taneler ve tane sınırları görülmektedir.

Şekil 8.11.(a)'da EDX analizine göre AlSr10 tane inceltici ilave edilen Al-%5Cu alaşımının seçilen bölgesinde bulunan elementlerin pikleri görülmektedir. Buna göre Al, Cu, Si, Mn, Mg ve Sr elementlerinin pikleri mevcuttur. Şekil 8.11.(b)'de elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Ağırlıkça %91.89 Al ve ağırlıkça %5.68Cu mevcuttur. Atomik olarak %95,25 Al ve %2,50 Cu bulunmaktadır. Cu elementi  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği halinde başlıca tane sınırlarında görülmektedir. Sr elementi seçilen bölgede ağırlıkça %0.28 Sr, atomik %0.09 Sr oranlarında bulunmaktadır.



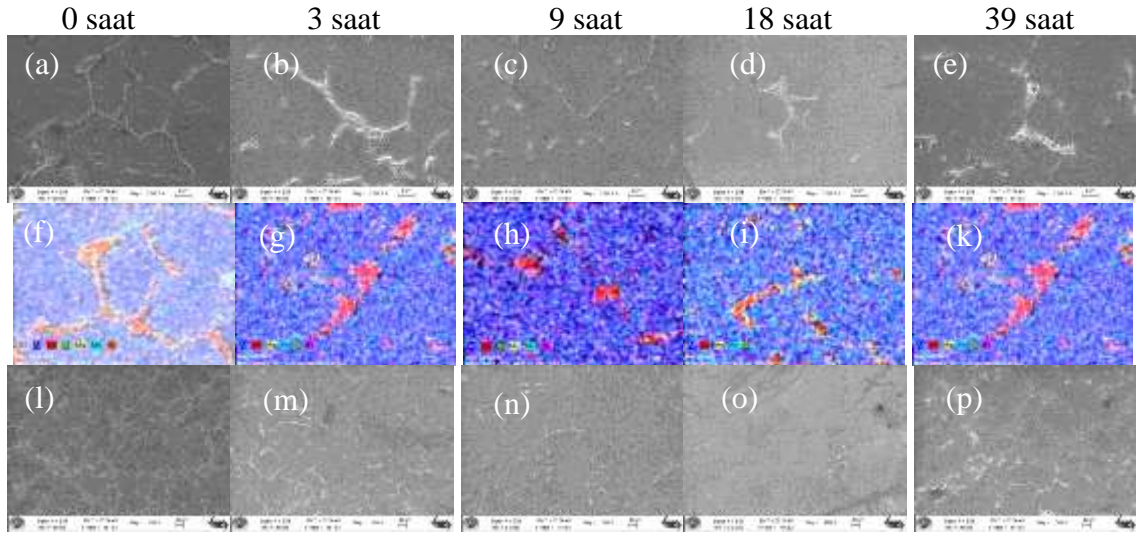
(a)

Spectrum: Haritalama					
Element	Series	unn.C [wt.%]	norm.C [wt.%]	Atom.C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	K-series	104.97	91.89	95.25	5.0
Bakır	K-series	6.48	5.68	2.50	0.2
Silisyum	K-series	0.11	0.09	0.09	0.0
Magnezyum	K-series	1.82	1.59	1.83	0.1
Mangan	K-series	0.53	0.46	0.23	0.0
Stronsiyum	L-series	0.32	0.28	0.09	0.1
Total:		114.23	100.00	100.00	

(b)

**Şekil 8.11.** AlSr10 Tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının EDX görüntüleri. (a) Al, Cu, Si, Mn, Mg ve Sr elementlerinin pikleri (b) Al-%5Cu alaşımında seçilen bölgede bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

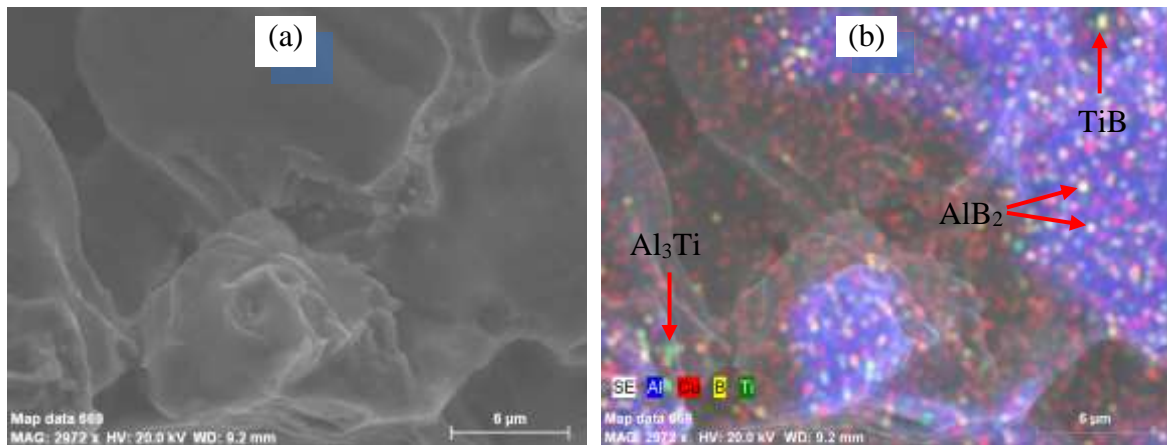
Şekil 8.12’de AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımına, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme işlemi uygulandıktan sonra, 175°C’de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı sürede yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Şekil 8.12.(a-e)’de X2000 büyütme beş farklı numuneden alınan SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.12.(a)’da tane sınırları çok belirgin bir haldedir. Daha sonra yaşlandırma süresinin artmasıyla tane sınırlarının dağıldığı görülmektedir. Şekil 8.12.(f-k)’da aynı numunelerin renklendirilmiş haritalama yöntemi ile mikro yapıda bulunan elementlerin dağılımları renklendirilmiş olarak görülmektedir. İlk durumda kırmızı renkle gösterilen  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği tane sınırlarında iken 18 saat yaşlandırma sonucunda bunların difüzyon yoluyla tane içinde de dağıldıkları görülmektedir. Şekil 8.12.(l-p) ile gösterilen resimler aynı numunelerden X500 büyütme ile alınan SEM görüntüleridir. Bu resimlerde de yaşlandırma süresinin artmasıyla tane sınırlarının zamanla dağıldığı görülmektedir.

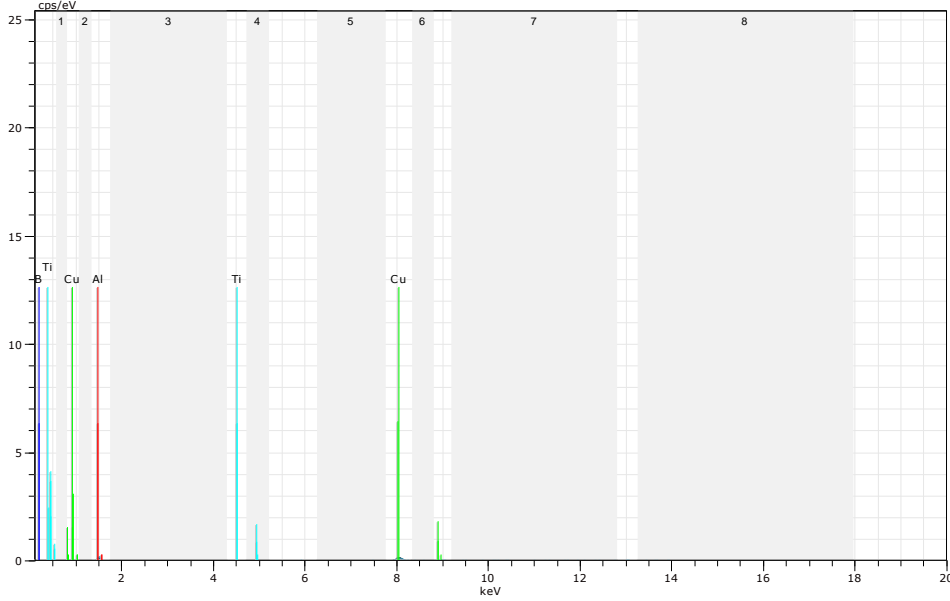


**Şekil 8.12.** AlSr10 Tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 175°C sıcaklıkta ve 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı yaşlandırma sürelerindeki SEM görüntüleri görülmektedir. (a-e) X2000 büyütmedeki SEM görüntüleri (f-k) X2014 büyütmedeki haritalama alan analizi SEM görüntüleri (l-p) X500 büyütmedeki SEM görüntüleri

#### 8.4.3. Al-3Ti-1B Girilen Al-%5Cu Alaşımlarının SEM Analiz Sonuçları

Şekil 8.13'te Al3Ti1B ile aşılantılmış, 535<sup>0</sup>C'de 4 saat çözeltiye alınmış, 25<sup>0</sup>C'de suda su verilmiş, 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşımının SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.13.a'da X2972 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 8.13.b'de X2972 büyütmede renklendirilmiş haritalama yöntemi SEM görüntüsü görülmektedir. Seçilen bölgede alaşımın içerisindeki TiB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> intermetalik bileşikler çok küçük boyutlu olarak ve dağılmış halde görülmektedir. Şekil 8.13.c'de seçilen bölgedeki EDX analizinde alaşım içinde bulunan Al, Cu, Ti ve B elementlerinin pikleri görülmektedir.

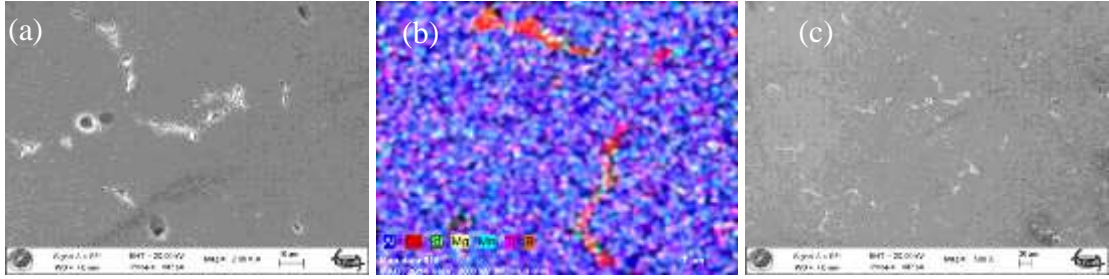




(c)

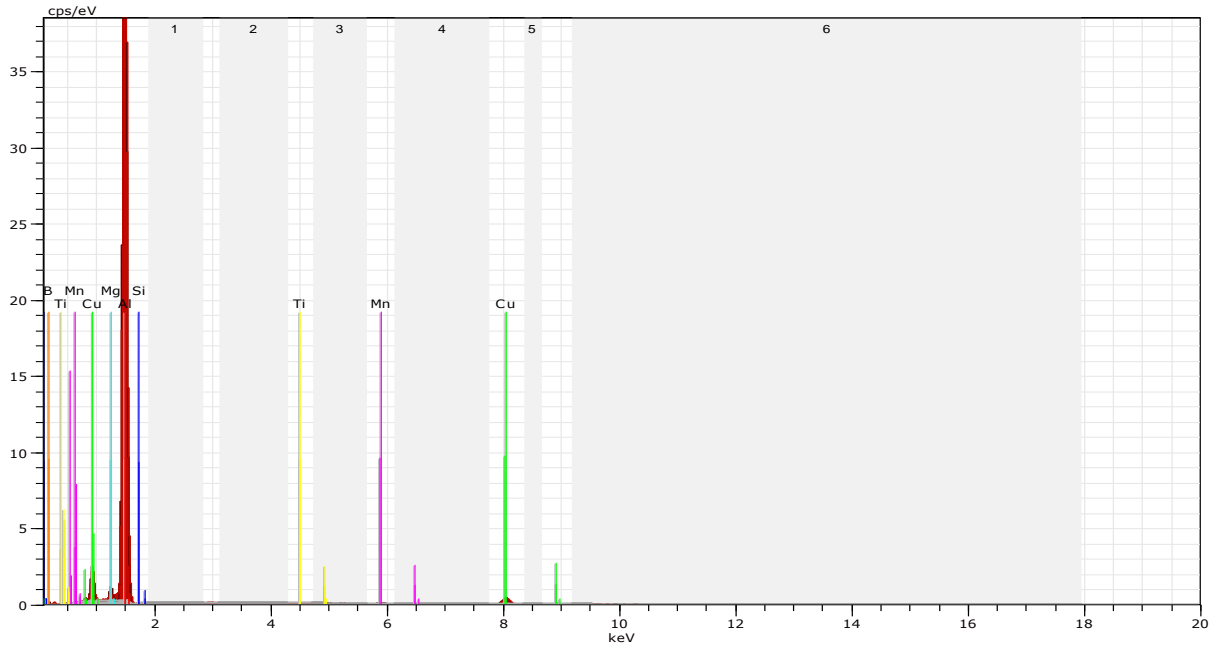
**Şekil 8.13** Al<sub>3</sub>Ti1B ile aşılınmış, 535<sup>0</sup>C’de 4 saat çözeltiye alınmış, 25<sup>0</sup>C’de suda su verilmiş, 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşımının SEM görüntüleri. (a) X2972 büyütmedeki SEM görüntüsü (b) X2972 büyütmede renklendirilmiş haritalama yöntemi SEM görüntüsü (c) seçilen bölgedeki EDX analizinde alaşım içinde bulunan elementlerin pikleri görülmektedir.

535<sup>0</sup>C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25<sup>0</sup>C’de suda su verme işlemi yapılmış, yaşlandırma yapılmamış olan Al-%5Cu alaşımına Al<sub>3</sub>Ti1B tane inceltici mastır alaşım ilave edilmiş alaşımın taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri Şekil 8.14’te görülmektedir. Şekil 8.14.a’da X2000 büyütmede gri renkli  $\alpha$ -Al matris ve beyaz renkli tane sınırları görülmektedir. Şekil 8.14.a’da X2000 büyütmede gri renkli  $\alpha$ -Al matris ve beyaz renkli tane sınırları görülmektedir. Şekil 8.14.b’de X2014 büyütmede renklendirilmiş haritalama yöntemiyle aynı bölgeden alınan SEM görüntüsünde,  $\alpha$ -Al alaşımının içerisinde bulunan Cu, Si, Mn, Mg, Ti ve B elementleri ve bunların dağılımları görülmektedir.  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği kırmızı renkli olarak tane sınırlarında biriktiği görülmektedir. Ti ve B elementleri ise Al<sub>3</sub>Ti, AlB<sub>2</sub> ve TiB<sub>2</sub> bileşikleri halinde yapının her tarafında homojen ve çok ince tanecikler halinde dağıldıkları görülmektedir. Şekil 8.14.c’de X500 büyütmedeki SEM görüntüsünde tane sınırları zayıf olarak görülmektedir.



**Şekil 8.14.** Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılansmış, 535°C'de 4 saat çözeltiye alınmış, yaşlandırılmamış olan Al-%5Cu alaşımının SEM görüntüleri. (a) X2000 büyütmedeki SEM görüntüsü. Gri renkli  $\alpha$ -Al matris ve beyaz gri renkte tane sınırları görülmektedir. (b) X2014 büyütmede renklendirilmiş haritalama SEM görüntüsü.  $\alpha$ -Al alaşımı içerisinde Cu, Si, Mn, Mg, Ti ve B elementlerinin dağılımı görülmektedir. (c) X500 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 8.15.a'da EDX analizine göre Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici ilave edilen, 535°C'de 4 saat çözeltiye alınan ve yaşlandırılmayan Al-%5Cu alaşımının seçilen bölgesinde bulunan elementlerin pikleri görülmektedir. Buna göre Al, Cu, Si, Mn, Mg, Ti ve B elementlerinin pikleri mevcuttur. Şekil 8.15.b'de elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Ağırlıkça %88,02 Al ve ağırlıkça %4,99 Cu mevcuttur. Atomik olarak %84,01 Al ve %2,02 Cu bulunmaktadır. Cu elementi  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği halinde tane sınırlarında görülmektedir. Ağırlıkça %0,11 Ti ve atomik olarak 0,06 Ti bulunmaktadır.



(a)

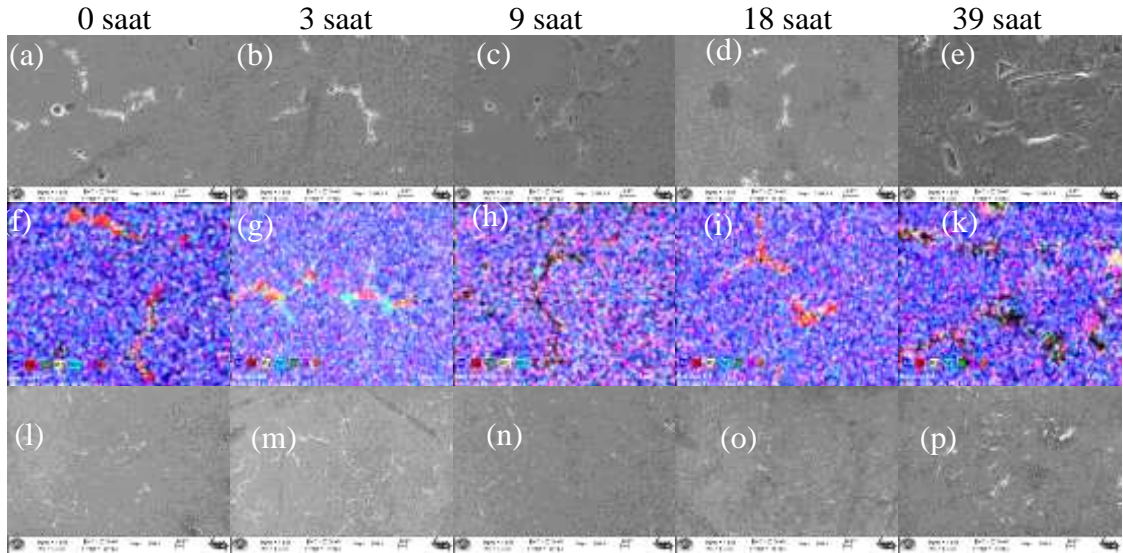


Element	Series	Spectrum: Haritalama		Atom. C [at.%]	Error [%]
		unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]		
Alüminyum	K-series	118.18	88.02	84.01	5.7
Bakır	K-series	6.71	4.99	2.02	0.2
Silisyum	K-series	0.11	0.08	0.08	0.0
Magnezyum	K-series	1.67	1.24	1.32	0.1
Mangan	K-series	0.49	0.36	0.17	0.0
Titanyum	K-series	0.15	0.11	0.06	0.0
Bor	K-series	6.96	5.18	12.34	1.8
Total:		134.26	100.00	100.00	

(b)

**Şekil 8.15.** Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının EDX görüntüleri. (a) Al, Cu, Si, Mn, Mg, Ti ve B elementlerinin pikleri (b) EDX analizinde Al-%5Cu alaşımında bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

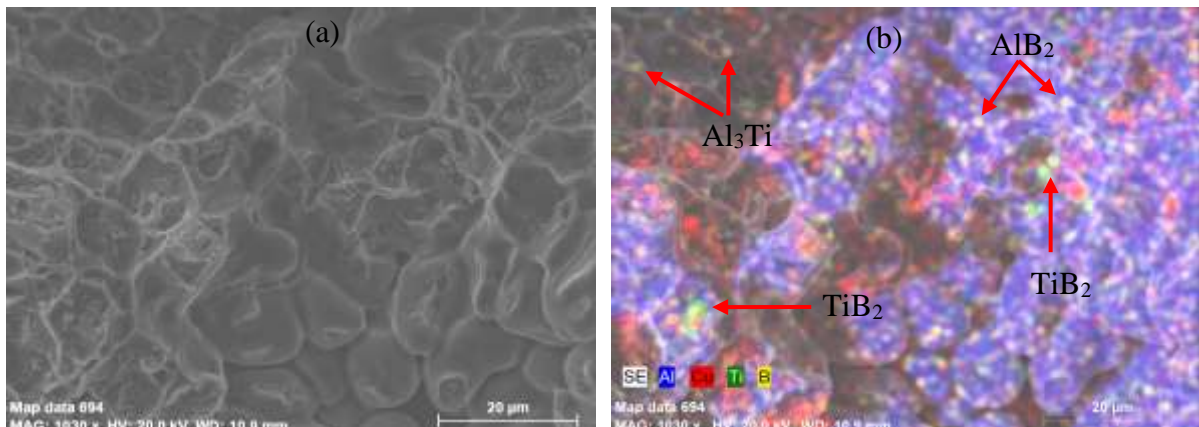
Şekil 8.16.'da Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımına, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltilme, 25°C'de suda su verme işlemi uygulandıktan sonra, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı sürede yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Şekil 8.16.(a-e) X2000 büyütme beş farklı sürede yaşlandırılan numunelerin (SEM) görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.16.(a)'da tane sınırları çok belirgin bir haldedir. Daha sonra yaşlandırma süresinin artmasıyla tane sınırlarının dağıldığı görülmektedir. Şekil 8.16.(f-k)'da aynı numunelerin renklendirilmiş haritalama analizi yöntemi ile mikro yapıda bulunan elementlerin dağılımları renklendirilmiş olarak görülmektedir. İlk durumda kırmızı renkle gösterilen  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği tane sınırlarında iken 18 saat yaşlandırma sonucunda bunların difüzyon yoluyla tane içinde dağıldıkları görülmektedir. Ti ve B elementleri ise Al<sub>3</sub>Ti, AlB<sub>2</sub> ve TiB<sub>2</sub> bileşikleri halinde yapının her tarafında homojen ve çok ince tanecikler halinde dağıldıkları görülmektedir. Şekil 8.16.(l-p) ile gösterilen resimler aynı numunelerden X500 büyütme ile alınmıştır. Bu resimlerde de yaşlandırma süresinin artmasıyla tane sınırlarının zamanla dağıldığı görülmektedir.



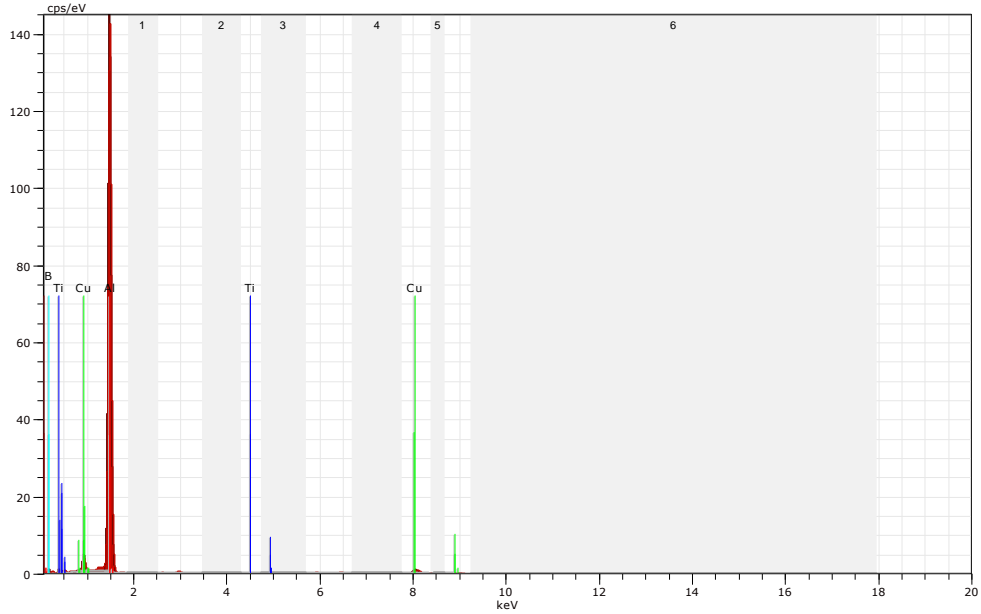
**Şekil 8.16.** Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 175°C sıcaklıkta ve 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı yaşlandırma sürelerindeki (SEM) analizi görüntüleri. (a-e) X2000 büyütmedeki SEM görüntüleri (f-k) X2014 büyütmedeki haritalama alan analizi SEM görüntüleri (l-p) X500 büyütmedeki SEM görüntüleri

#### 8.4.4. Al-5Ti-1B Girilen Al-%5Cu Alaşımlarının SEM Analiz Sonuçları

Şekil 8.17'de Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılınmış, 535<sup>0</sup>C'de 4 saat çözeltilmiş, 25<sup>0</sup>C'de suda su verilmiş, 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşımının SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.17.a'da X1030 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 8.17.b'de X1030 büyütmede renklendirilmiş haritalama yöntemi SEM görüntüsü görülmektedir. Seçilen bölgede alaşımın içerisindeki TiB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> intermetalik bileşikler çok küçük boyutlu olarak ve dağılmış halde görülmektedir. Şekil 8.17.c'de seçilen bölgedeki EDX analizinde alaşım içinde bulunan Al, Cu, Ti ve B elementlerinin pikleri görülmektedir. Şekil 8.17.d'de EDX analizinde alaşımda bulunan Al, Cu, Ti, ve B gibi elementlerin atomik ve ağırlıkça yüzde oranları verilmiştir. Buna göre Al, Cu ve Ti elementlerinin ağırlıkça yüzde oranları sırasıyla; %76.15Al, %4.51Cu ve %0.22 Ti'dur.







(c)

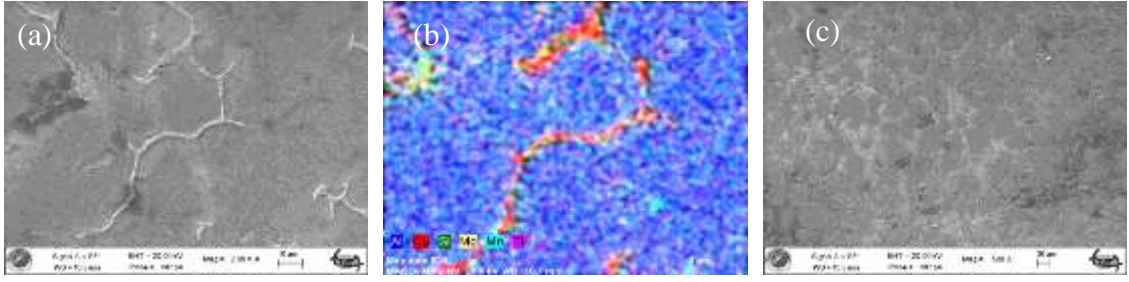
Spectrum: Map

Element	Series	unn.C [wt.%]	norm.C [wt.%]	Atom.C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	K-series	82.19	76.15	60.47	3.9
Bakır	K-series	4.86	4.51	1.52	0.2
Titanyum	K-series	0.23	0.22	0.10	0.0
Bor	K-series	20.65	19.13	37.91	3.1
Total:		107.93	100.00	100.00	

(d)

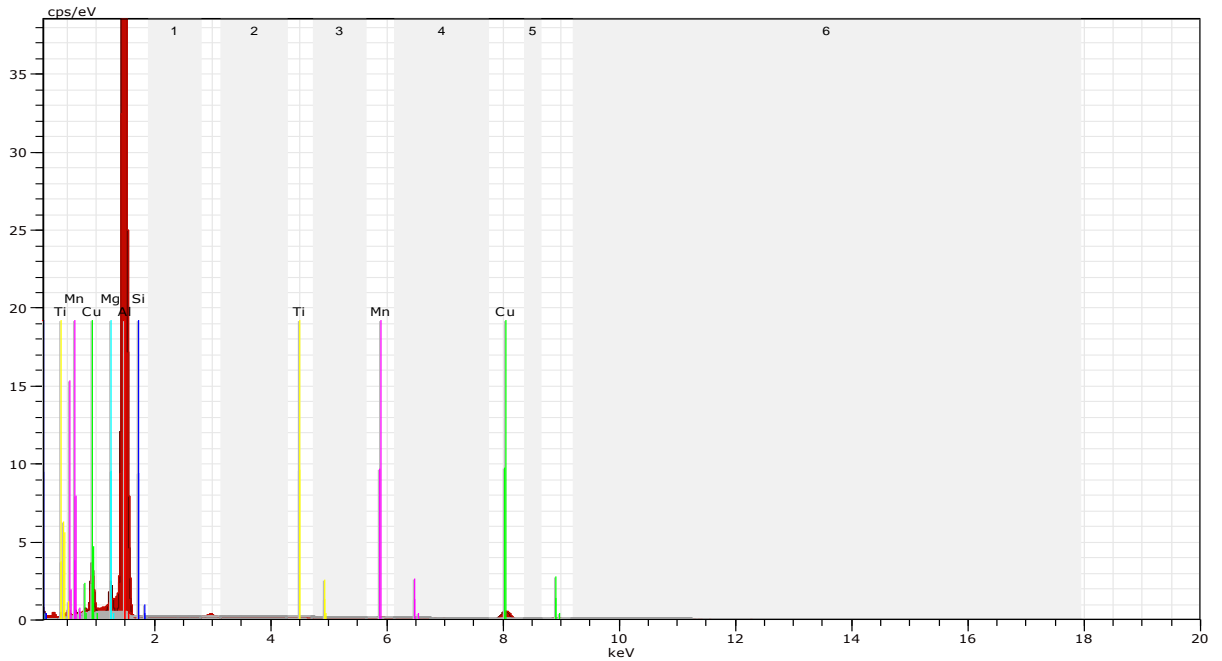
**Şekil 8.17** Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılınmış, 535<sup>0</sup>C’de 4 saat çözeltiye alınmış, 25<sup>0</sup>C’de suda su verilmiş, 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşımının SEM görüntüleri. (a) X1030 büyütmedeki SEM görüntüsü (b) X1030 büyütmede renklendirilmiş haritalama yöntemi ile SEM görüntüsü (c) seçilen bölgedeki EDX analizinde alaşım içinde bulunan Al, Cu, Ti, B gibi elementlerin pikleri görülmektedir. (d) seçilen bölgedeki EDX analizinde alaşım içinde bulunan elementlerin atomik ve ağırlıkça yüzde oranları.

Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılınmış, 535<sup>0</sup>C’de 4 saat çözeltiye alınmış ve yaşlandırma yapılmamış Al-%5Cu alaşımının SEM görüntüleri Şekil 8.18.’de görülmektedir. Şekil 8.18.(a)’da gri renkli  $\alpha$ -Al taneleri ve beyaz renkli tane sınırları. Şekil 8.18.(b)’de renklendirilmiş haritalama analizi yöntemiyle aynı bölgeden alınan SEM görüntüsünde,  $\alpha$ -Al matris ile Al-Cu alaşımının içerisinde bulunan Cu, Si, Mn, Mg ve Ti elementleri ve bunların dağılımları görülmektedir.  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği kırmızı renkli olarak tane sınırlarında biriktiği görülmektedir. Ti ve B elementleri ise Al<sub>3</sub>Ti, AlB<sub>2</sub> ve TiB<sub>2</sub> bileşikleri halinde yapının her tarafında homojen ve çok ince tanecikler halinde dağıldıkları görülmektedir. Şekil 8.18.(c)’de X500 büyütmedeki SEM görüntüsünde tane sınırları zayıf olarak görülmektedir.



**Şekil 8.18.** Al5Ti1B ile aşılınmış, 535°C’de 4 saat çözeltiye alma işlemi uygulanmış, yaşlandırılmamış olan Al-%5Cu alaşımına alaşımın SEM görüntüleri. **(a)** X2000 büyütmedeki SEM görüntüsü. Gri renkli  $\alpha$ -Al taneleri ve beyaz gri renkte tane sınırları görülmektedir. **(b)** X1939 büyütmede renklendirilmiş haritalama SEM görüntüsü.  $\alpha$ -Al alaşımı içerisinde Cu, Si, Mn, Mg ve Ti elementlerinin dağılımı görülmektedir. **(c)** X500 büyütmedeki SEM görüntüsünde taneler ve tane sınırları görülmektedir.

Şekil 8.19.a’da EDX analizine göre Al5Ti1B tane inceltici ilave edilen Al-%5Cu alaşımının seçilen bölgesinde bulunan elementlerin pikleri görülmektedir. Buna göre Al, Cu, Si, Mn, Mg, ve Ti elementlerinin pikleri mevcuttur. Şekil 8.19.b’de elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Ağırlıkça %93,33 Al ve ağırlıkça %4,51 Cu mevcuttur. Atomik olarak %95,91 Al ve %1,97 Cu bulunmaktadır. Cu elementi  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği halinde tane sınırlarında görülmektedir. Ağırlıkça %0,15 Ti ve atomik olarak %0,09 Ti bulunmaktadır.



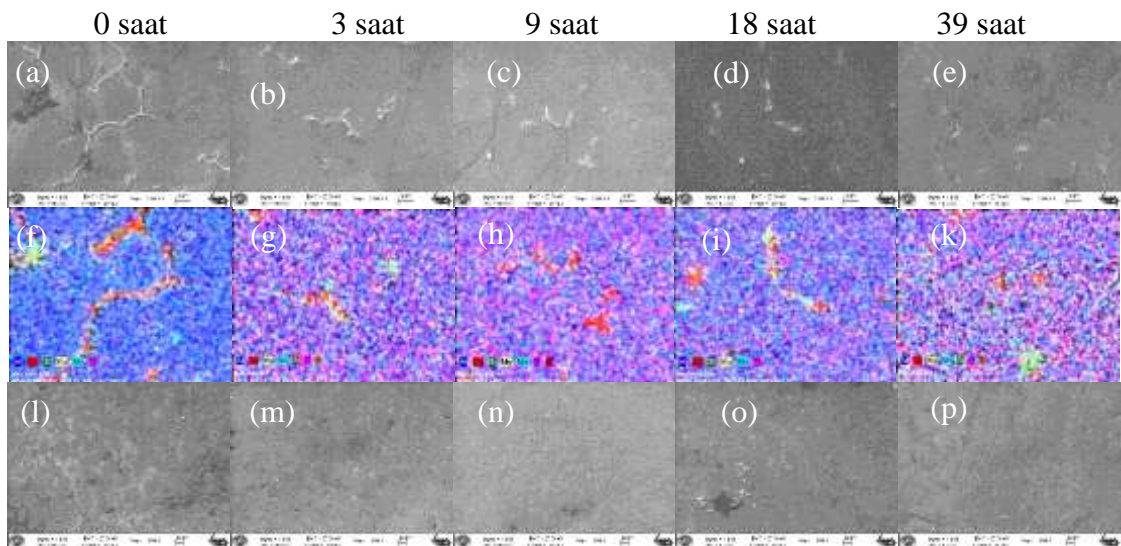
**(a)**

Element	Seri	Spectrum: Haritalama		Atom. C [at.%]	Error [%]
		unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]		
Alüminyum	K-series	112.72	93.33	95.91	5.4
Bakır	K-series	5.44	4.51	1.97	0.2
Silisyum	K-series	0.14	0.12	0.12	0.0
Magnezyum	K-series	1.82	1.51	1.72	0.1
Mangan	K-series	0.46	0.38	0.19	0.0
Titanyum	K-series	0.18	0.15	0.09	0.0
Total:		120.77	100.00	100.00	

(b)

**Şekil 8.19** Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının EDX görüntüleri. (a) Al, Cu, Si, Mn, Mg ve Ti elementlerinin pikleri (b) Al-%5Cu alaşımında bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

Şekil 8.20'de Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımına, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma işlemi uygulandıktan sonra, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı sürede yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Şekil 8.20.(a-e)'de X2000 büyütme beş farklı numuneden alınan SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.20.a'da tane sınırları çok belirgin bir haldedir. Daha sonra yaşlandırma süresinin artmasıyla tane sınırlarının dağıldığı görülmektedir. Şekil 8.20.(f-k)'da aynı numunelerin renklendirilmiş haritalama analizi yöntemi ile mikro yapıda bulunan elementlerin ve bileşiklerin dağılımları renklendirilmiş olarak görülmektedir. İlk durumda kırmızı renkle gösterilen  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği tane sınırlarında iken 18 saat yaşlandırma sonucunda bunların difüzyon yoluyla tane içinde de dağıldıkları görülmektedir. Şekil 8.20.(l-p) ile gösterilen resimler aynı numunelerden X500 büyütme ile alınmıştır. Bu resimlerde de yaşlandırma süresinin artmasıyla tane sınırlarının zamanla dağıldığı görülmektedir.



**Şekil 8.20** Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 175°C sıcaklıkta ve 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı yaşlandırma sürelerindeki SEM analizi görüntüleri. (a-e) X2000 büyütmedeki SEM görüntüleri (f-k) X2014 büyütmedeki haritalama alan analizi SEM görüntüleri (l-p) X500 büyütmedeki SEM görüntüleri

### 8.5. XRD Analizlerinin Sonuçları

Bu çalışmada, alüminyum içerisine %5Cu alaşım elemanı olarak girilmiştir. Al-Cu faz denge diyagramından, Al içerisinde %5Cu girildiği zaman  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu intermetalik bileşiği teşekkül eder. Al-Cu alaşımına tane inceltme amacıyla AlSr10 aşılama girdiğimizde bu AlSr10 mastır alaşımı sıvı metal içerisinde çözünerek çok sayıda AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr intermetalik bileşikler teşekkül eder. Ve bu bileşikler partikül halinde sıvı metal içerisinde dağılırlar. Kararlı durumda olan AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr bileşikler sıvı alüminyum alaşımlarının katılaşması sırasında heterojen çekirdekçik görevi görürler.

Ergimiş sıvı metal içerisinde bulunan çekirdekçiklerin çok sayıda olması katılaşma sonundaki tane boyutunun büyüklüğünü etkiler çünkü çekirdeklerin büyümesi, tanelerin birbirleriyle temas etmesiyle duracaktır. Sıvı metal içerisinde çekirdekçik yoğunluğu fazla olursa taneler daha fazla büyüme göstermeden katılaşma tamamlanacak ve böylece katılaşmış nihai durumda eş eksenli ince taneli bir kristal yapısı ortaya çıkacaktır.

AlSr10 aşılama girilen alüminyum alaşımlarının XRD analizlerinde, 2 $\theta$  açılarında AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr bileşiklerinin pik verdikleri görülmektedir. Çok sayıda olan AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr piklerinin belli başlı olanlarını burada ele alıyoruz. 2 $\theta$  açılarında yansıma gösteren bu bileşiklerin hangi açılarda, hangi (hkl) düzlemlerde ve hangi pik şiddetinde oldukları XRD diyagramlarından görülmektedir.

Seçilen bölgede aynı zamanda bu bileşiklerin yüzde oranları da XRD grafiklerinden elde edilerek gösterilmiştir. Bu çalışmada AlSr10 aşılama ilave edilen alaşımlarda AlSr yüzde oranının, Al<sub>4</sub>Sr yüzde oranına göre yaklaşık iki katı olduğu XRD grafiklerinde görülmektedir. Çizelge 8.2'de AlSr10 tane inceltici ile aşılama Al-Cu alaşımının 175°C'de 15 ve 18 saat yaşlandırma sonucunda, XRD analizlerinde elde edilen, bileşikler ve bu bileşiklerin ağırlıkça yüzde oranları görülmektedir. Bu çizelgeye göre, AlSr bileşiği 175°C sıcaklıkta 15 saat yaşlanmada ağırlıkça %62,4 oranında iken 18 saat yaşlanmada ağırlıkça %62,6 değerine az bir yükselme göstermiştir. Al<sub>4</sub>Sr bileşiği, 175°C sıcaklıkta 15 saat yaşlanmada ağırlıkça %26,0 oranında iken 18 saat yaşlanmada ağırlıkça %28,6 değerine artış göstermiştir. Diğer taraftan 15 saat

yaşlanmada ağırlıkça %11,6 değerinde olan  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu intermetalik bileşiği 18 saat yaşlanma süresinde azalma göstererek ağırlıkça %8,8 değerine düşmüştür.

**Çizelge 8.2.** AlSr10 tane inceltici ile aşıl原因an Al-Cu alaşımasının 175<sup>0</sup>C'de 15 ve 18 saat yaşlandırma sonucunda, XRD analizlerinde elde edilen, alüminyum alaşımasının katılaşmasında çekirdek olarak davranan bileşikler ve bu bileşiklerin ağırlıkça yüzde oranları.

AlSr10 ile aşıl原因an Al-Cu alaşımasının heterojen çekirdeklenmesinde alt tabaka görevi gören AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr

kararlı bileşikleri

Yaşlandırma Süresi	AlSr [Ağ.%]	Al <sub>4</sub> Sr [Ağ.%]	$\theta$ -Al <sub>2</sub> Cu [Ağ.%]
15 Saat	62,4	26,0	11,6
18 Saat	62,6	28,6	8,8

Al-Cu alaşımına tane inceltici olarak Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşıl原因ıcıları girdiğimizde, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B mastır alaşımları sıvı metal içerisinde çözünerek çok sayıda TiB<sub>2</sub>, AlB<sub>2</sub> ve Al<sub>3</sub>Ti bileşikleri teşekkül ederek bunlar partikül halinde sıvı metal içerisinde dağılırlar. TiB<sub>2</sub> ve AlB<sub>2</sub> bileşikleri Al ergime sıcaklığı olan 660<sup>0</sup>C ve üzerindeki 760<sup>0</sup>C'deki döküm sıcaklıklarında kararlıdır ve sıvı metal içinde erime göstermeden varlıklarını korurlar. Ergimiş sıvı metal içinde kararlı durumda olan TiB<sub>2</sub> ve AlB<sub>2</sub> bileşikleri, sıvı alüminyum alaşımlarının katılaşması sırasında heterojen çekirdekçikler için alt tabaka görevi görürler. Çekirdekler bu alt tabakalar üzerinde büyüme gösterirler. Al<sub>3</sub>Ti bileşiği 660-760<sup>0</sup>C sıcaklık aralığında erir ve çözünme gösterir. Al<sub>3</sub>Ti bileşiği çözündüğü zaman ortaya çıkan Ti elementi, çekirdekçiğin büyümesine olumlu yönde etki eder. TiB<sub>2</sub> bileşiği çekirdekçik için alt tabaka olarak bulunduğu Al tanecikleri bu çekirdekler üzerinde büyüme gösterirler. Sıvı metal içerisinde Al<sub>3</sub>Ti bileşiğinin çözünmesiyle ortaya çıkan Ti elementi, TiB<sub>2</sub> çekirdekçiği tarafına doğru difüzyonla hareket ederek çekirdekçiğin büyümesine katkıda bulunur. Ergimiş sıvı metal içerisinde bulunan çekirdekçiklerin çok sayıda olması katılaşma sonundaki tane boyutunun büyüklüğünü/küçüklüğünü etkiler. Katılaşmış nihai durumda eş eksenli ince taneli bir yapı ortaya çıkar.

Bu çalışmada Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane incelticileri aşıl原因ıcı olarak kullanılmıştır. Bu iki aşıl原因ıcıların B elementi oranları eşit olup Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşıl原因ıcının Ti oranı daha yüksektir. Deneyler sonunda elde ettiğimiz verilerden Ti oranı yüksek olan

aşılacağı, tane boyutu inceltme etkisi daha yüksek olarak elde edilmiştir. Bu durum, Ti elementi oranı ne kadar artırılırsa tane boyutu da o oranda incelme gösterecek anlamına gelmemektedir. Çünkü belli bir değerden sonra aşılacağı olarak girilen Ti elementinin oranı artırılırsa bile tane boyutu incelme oranı sabit kalmaktadır. Yapılan çalışmalarda bu değer %0,6 Ti optimum değer olarak gösterilmiştir.

Ergimiş sıvı haldeki Al-%5Cu alaşımına aşılacağı olarak Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B girildiğinde, bu aşılacağılar sıvı alüminyum içerisinde çözünme göstererek kararlı TiB<sub>2</sub> ve AlB<sub>2</sub> bileşikler ortaya çıkmaktadır. Kararlı TiB<sub>2</sub> ve AlB<sub>2</sub> bileşikler, katılma sırasında alüminyumun çekirdeklenmesinde heterojen çekirdekçikler için alt tabaka olarak davranırlar. Alüminyum taneleri bu çekirdekçikler üzerinde büyüme gösterirler. Bu çalışmada TiB<sub>2</sub>, AlB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu gibi bileşikler, XRD analizlerinde 2 $\theta$  açılarında difraksiyon kırınimleri göstermişlerdir. XRD grafik analizlerinde, AlB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiklerinin; hangi 2 $\theta$  açılarında pik verdikleri, bu piklerin şiddetleri ve kristal kafesi (hkl) düzlemleri görülmektedir. Seçilen bölgelerde elde edilen XRD difraksiyon yansımalarından bu bileşiklerin yüzde oranları da elde edilmektedir.

Çizelge 8.3'te Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılacağı girilen, 175°C sıcaklıkta 12, 15 ve 18 saat yaşlandırma neticesinde, XRD analizlerinde elde edilen alüminyum alaşımının katılma sırasında çekirdekçikler için alt tabaka olarak davranan bileşikler ve bu bileşiklerin ağırlıkça yüzde oranları görülmektedir. Çizelge 8.3'e göre; 12, 15 ve 18 saat yaşlandırılan Al-Cu alaşımının yapısında bulunan kararsız Al<sub>3</sub>Ti bileşiğinin ağırlıkça yüzde oranları sırasıyla, %89.6, %84.8 ve %76.2 olarak elde edilmiştir. Yaşlanma süresinin artmasıyla Al<sub>3</sub>Ti bileşiğinin oranı azalmaktadır. Kararlı AlB<sub>2</sub> bileşiğinin ağırlıkça yüzde oranları sırasıyla; %8.2, %12.3 ve %19.2 olarak bulunmuştur. Yaşlanma süresinin artmasıyla AlB<sub>2</sub> bileşiğinin oranı artış göstermektedir. Alaşımın yapısında bulunan kararlı TiB<sub>2</sub> bileşiğinin ağırlıkça yüzde oranları sırasıyla, %1.6, %1.7 ve %3.7 olarak elde edilmiştir. Yaşlanma süresinin artmasıyla alaşımın içyapısında bulunan kararlı TiB<sub>2</sub> bileşiğinin oranı artış göstermektedir. Alaşımın içyapısındaki kararlı AlB<sub>2</sub> ve TiB<sub>2</sub> bileşiklerin oranının artması, nihai tane boyutunun incelmeye katkıda bulunmaktadır.

**Çizelge 8.3.** Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici ile aşıl原因an Al-Cu alaşımasının 175°C’de 12, 15 ve 18 saat yaşlandırma sonucunda, XRD analizlerinde elde edilen, alüminyum alaşımasının katılaşmasında çekirdekçikler için alt tabaka olarak davranan intermetalik bileşikler ve bu bileşiklerin ağırlıkça yüzde oranları.

Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşıl原因an Al-Cu alaşımasının heterojen çekirdeklenmesinde alt tabaka görevi gören bileşikler

Yaşlandırma Süresi	TiB <sub>2</sub> [Ağ.%]	AlB <sub>2</sub> [Ağ.%]	Al <sub>3</sub> Ti [Ağ.%]	θ-Al <sub>2</sub> Cu [Ağ.%]
12 Saat	1,6	8,2	89,6	0,6
15 Saat	1,7	12,3	84,8	1,2
18 Saat	3,7	19,2	76,2	0,9

Çizelge 8.4’te Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici ile aşıl原因an Al-Cu alaşımasının 175°C’de 6, 12 ve 18 saat yaşlandırma sonucunda, XRD analizlerinde elde edilen, alüminyum alaşımasının katılaşmasında heterojen çekirdekçikler için alt tabaka olarak davranan bileşikler ve bu bileşiklerin ağırlıkça yüzde oranları görülmektedir. Çizelge 8.4’e göre; 6, 12 ve 18 saat yaşlandırma süreleri sonucunda; alaşımanın yapısında bulunan kararsız Al<sub>3</sub>Ti bileşiğinin ağırlıkça yüzde oranları sırasıyla, %81.4, %78.0 ve %73.1 olarak elde edilmiştir. Yaşlanma süresinin artmasıyla Al-Cu alaşımı içerisinde teşekkül eden Al<sub>3</sub>Ti bileşiğinin oranı azalmaktadır. 175°C’de, 6, 12 ve 18 saat yaşlandırma süreleri sonucunda; kararlı AlB<sub>2</sub> bileşiğinin ağırlıkça yüzde oranları sırasıyla; %13.9, %15.2 ve %20.7 olarak bulunmuştur. Yaşlanma süresinin artmasıyla AlB<sub>2</sub> bileşiğinin oranı artış göstermektedir. 175°C’de, 6, 12 ve 18 saat yaşlandırma süreleri sonucunda; Al-Cu alaşımasının yapısında bulunan kararlı TiB<sub>2</sub> bileşiğinin ağırlıkça yüzde oranları sırasıyla, %2.6, %4.0 ve %5.0 olarak elde edilmiştir. Yaşlanma süresinin artmasıyla alaşımanın içyapısında bulunan kararlı TiB<sub>2</sub> bileşiğinin oranı artış göstermektedir. Alaşımanın içyapısındaki kararlı AlB<sub>2</sub> ve TiB<sub>2</sub> bileşiklerin oranının artması, nihai tane boyutunun incelmesine katkıda bulunmaktadır.

**Çizelge 8.4.** Al<sub>5</sub>TiB tane inceltici ile aşıl原因 Al-Cu alaşımasının 175°C'de 6, 12 ve 18 saat yaşlandırma sonucunda, XRD analizlerinde elde edilen, alüminyum alaşımasının katılaşmasında heterojen çekirdekçikler için alt tabaka olarak davranan bileşikler ve bu bileşiklerin ağırlıkça yüzde oranları.

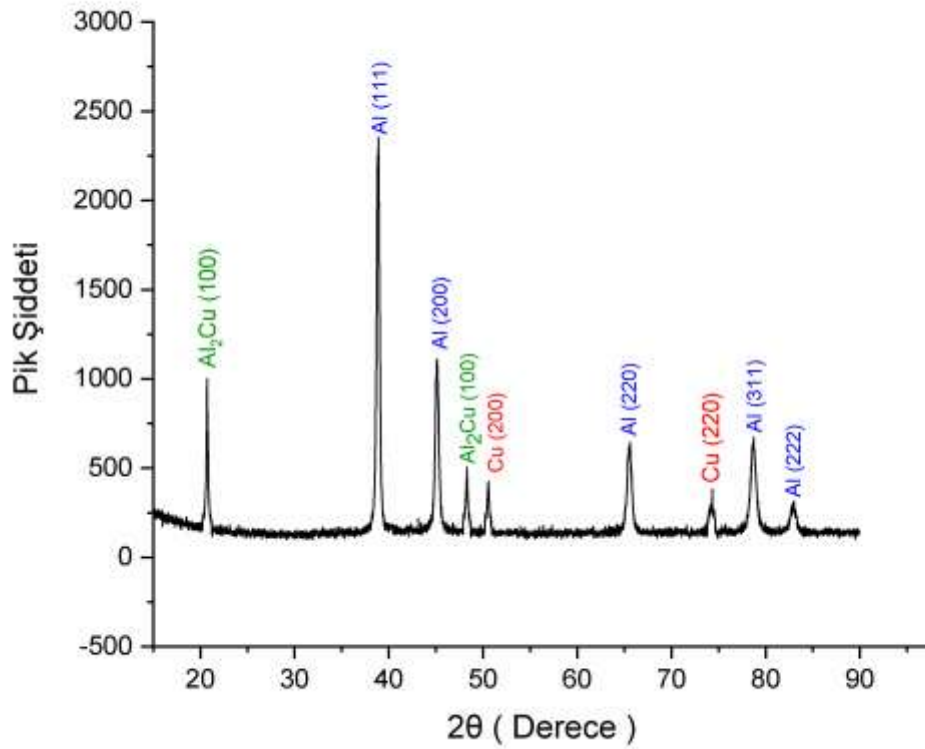
**Al<sub>5</sub>TiB** ile aşıl原因 Al-Cu alaşımasının heterojen çekirdeklenmesinde alt tabaka görevi gören bileşikler

Yaşlandırma Süresi	TiB <sub>2</sub> [Ağ.%]	AlB <sub>2</sub> [Ağ.%]	Al <sub>3</sub> Ti [Ağ.%]	θ-Al <sub>2</sub> Cu [Ağ.%]
6 Saat	2,6	13,9	81,4	2,1
12 Saat	4,0	15,2	78,0	2,9
18 Saat	5,0	20,7	73,1	1,2

### 8.5.1. Tane İnceltici Girilmeyen Al-Cu Alaşımasının XRD İnceleme Sonuçları

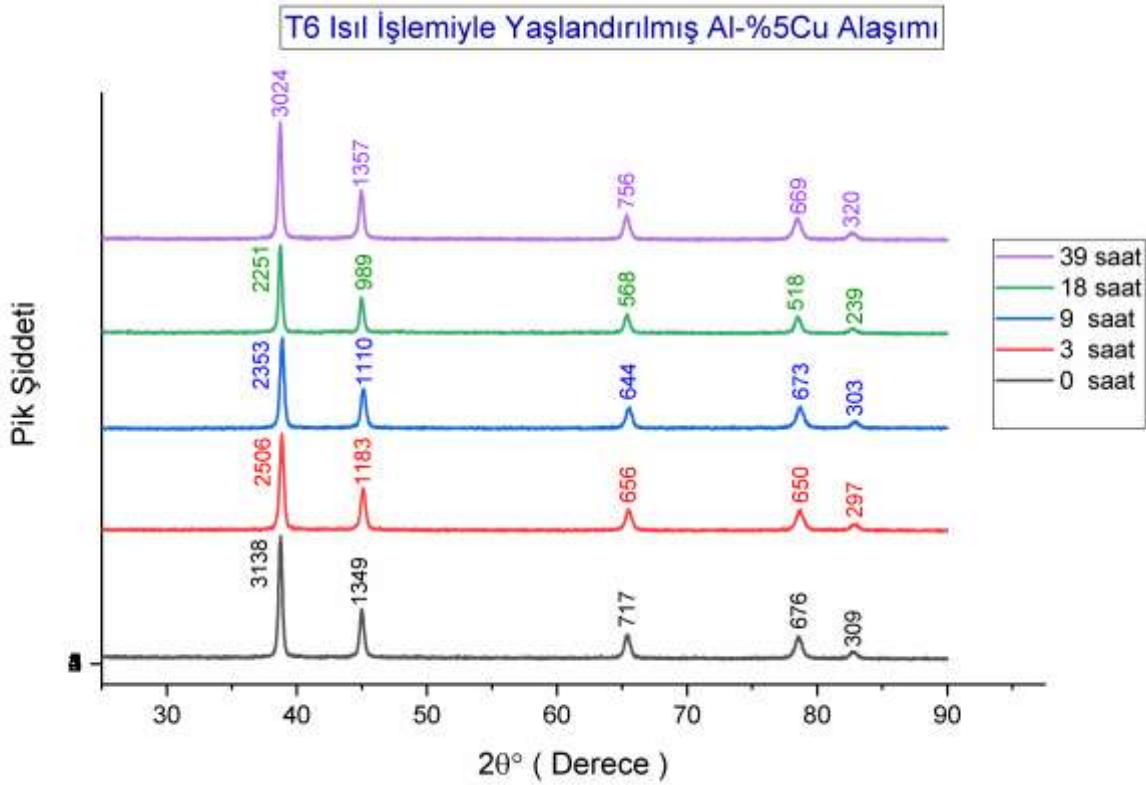
Şekil 8.21'de tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımasının XRD grafiğinde Al, Cu elementleri ve θ-Al<sub>2</sub>Cu bileşiğinin 2θ açıları ve difraksiyon kırınım düzlemleri görülmektedir. **Al** elementi başlıca; Al(111)-38.610°, Al(200)-44.833°, Al(220)-65.186°, Al(311)-78.306°, Al(222)-82.352° kristal kırınım düzlemlerinde ve 2θ açılarında pik yapmıştır. **Cu** elementi; Cu(111)-43.408°, Cu(200)-50.557°, Cu(220)-74.299°, Cu(311)-90.166°, Cu(222)-95.398° kristal düzlemlerinde ve 2θ açılarında pik yapmıştır. **θ-Al<sub>2</sub>Cu** bileşiği; θ-Al<sub>2</sub>Cu(100)-20.737°, θ-Al<sub>2</sub>Cu(200)-42.195°, θ-Al<sub>2</sub>Cu(111)-48.298°, θ-Al<sub>2</sub>Cu(211)-61.907°, θ-Al<sub>2</sub>Cu(301)-77.773°, θ-Al<sub>2</sub>Cu(311)-81.547° kristal kırınım düzlemlerinde ve 2θ açılarında pik yapmıştır.



Al-%5Cu Alaşımının içinde bulunan Al<sub>2</sub>Cu bileşiklerinin xrd pikleri

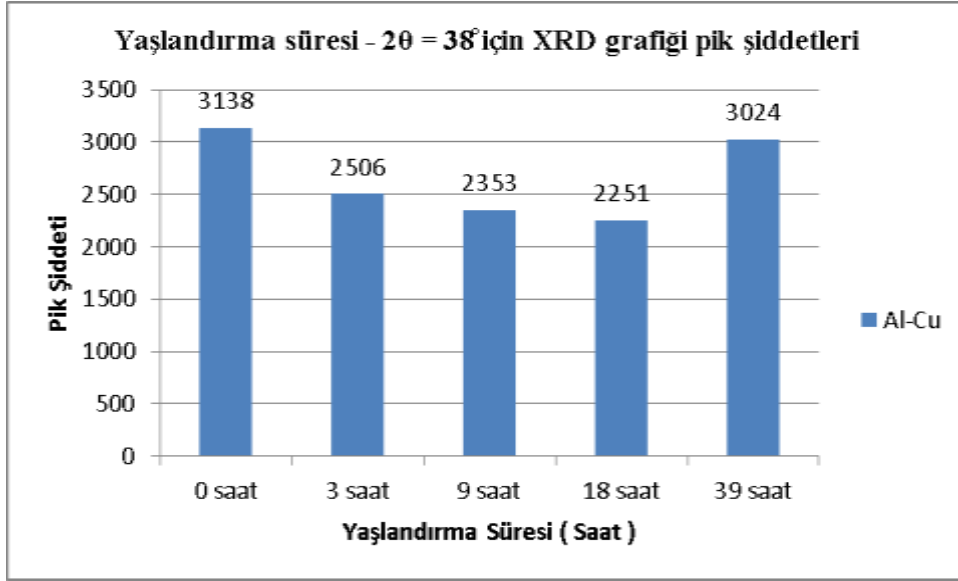
**Şekil 8.21.** Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğindeki Al, Cu elementleri ve  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiğinin,  $2\theta$  açıları ile XRD difraksiyon kırınım düzlemleri ve pikleri.

Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımının; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerindeki XRD mikro grafikleri Şekil 8.22'de görülmektedir. Al elementi (111) (hkl) kristal düzlemi için  $2\theta$  açısının XRD pik yükseklikleri; 38°, 45°, 65°, 78° ve 82° derecelerinde elde edilmiştir. Tane inceltici girilmeyen ve yaşlandırma yapılmayan Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde, Al elementinin (111) kristal düzleminde  $2\theta$  açısının 38°deki pik şiddeti, 3138 pik yüksekliğine sahip iken 3 saat yaşlandırmada 2506 pik değerine düşmüştür. Yaşlandırma süresinin artmasıyla pik yüksekliği düşme göstererek 18 saat yaşlandırmada 2251 değerine azalmıştır. 18 saat yaşlandırmadan sonra pik yüksekliği tekrar artmaya başlamıştır. 39 saat aşırı yaşlandırmada pik yüksekliği 3024 değerine yükselmiştir.



**Şekil 8.22.** Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımlarının, 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C sıcaklıkta ve 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerindeki XRD mikro grafikleri.

Tane inceltici girilmeyen, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C’de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı sürede yaşlandırılmış Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde Al elementinin (111) kristal düzleminde 38°’deki 2θ açısındaki pik şiddetlerinin, yaşlandırma sürelerine karşı değişimi Şekil 8.23’te görülmektedir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla pik şiddeti azalmaktadır. Pik şiddetindeki bu azalma 18 saat yaşlandırma süresine kadar devam etmekte ve 18 saatten sonraki yaşlandırma sürelerinde pik şiddeti tekrar artış göstermektedir. Şekil 8.23’teki XRD grafiğinde Al elementinin (111) kristal düzleminde 38°’de 2θ açılarındaki pik şiddetleri, yaşlandırma yapılmadığı durumda 3138 iken, sırasıyla bu değerler 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşılık; 2506, 2353, 2251 ve 3024 pik şiddet değerleri olarak elde edilmiştir.



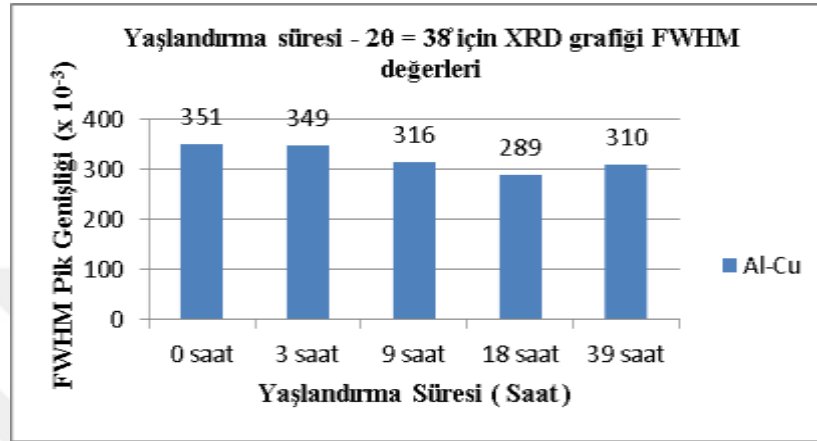
**Şekil 8.23.** XRD grafiklerinde; tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımlarındaki Al elementi için 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı; (111) kristal düzlemi  $2\theta = 38^\circ$  açısındaki piklerin şiddetleri.

Şekil 8.24.'te XRD grafiklerinde; tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde Al elementinin (111) kristal düzleminde  $38^\circ$  derecedeki  $2\theta$  açılarının; 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı, FWHM (Pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri görülmektedir.

Pik yüksekliğinin yarısındaki yatay genişleme, malzemenin kristal boyutuyla ilgilidir. Pik yarı yüksekliğindeki bu genişlemenin sebepleri; alaşımın yapısında bulunan katkı maddelerinin mevcudiyeti ve kristal bozuklukları olarak gösterilebilir. Şekil 8.24'te yaşlandırma süresinin artmasıyla, 18 saat yaşlandırma süresine kadar FWHM genişlik değerlerinde düşme görülmektedir. 39 saat yaşlandırmada ise nispeten yükselme görülmektedir. Yaşlandırma yapılmadığı haldeki FWHM değeri  $0.351 \mu\text{m}$  iken 3 saat yaşlandırma süresinde  $0.349 \mu\text{m}$  ve 18 saat yaşlandırma süresinde  $0.289 \mu\text{m}$  değerine azalma göstermiştir. 39 saat aşırı yaşlandırma süresinde FWHM değeri tekrar artış göstererek  $0.310 \mu\text{m}$  değerine yükselmiştir. Çizelge 8.5'te tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımındaki Al elementinin  $175^\circ\text{C}$ 'de beş farklı yaşlandırma sürelerine karşılık Al (111) kristal düzlemi için,  $2\theta=38^\circ$  açılarındaki FWHM değerlerindeki değişim görülmektedir.

**Çizelge 8.5** Tane inceltici girilmemiş Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde, 175°C'deki farklı yaşlandırma sürelerine karşılık,  $2\theta=38^\circ$  için Al (111) kristal düzlemlerindeki FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri.

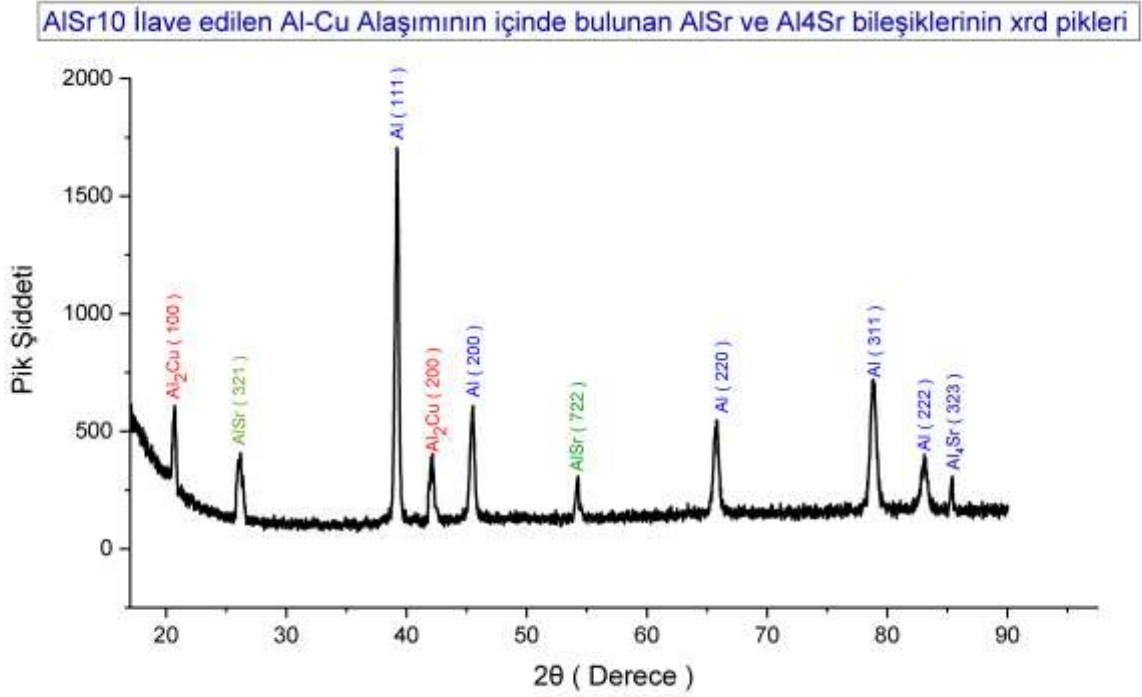
Yaşlandırma Süresi (Saat)	0	3	9	18	39
FWHM Değerleri ( $\mu\text{m}$ )	0,351	0,349	0,316	0,289	0,310



**Şekil 8.24.** XRD grafiklerinde; tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımlarındaki Al (111) kristal düzlemi için 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı,  $2\theta = 38^\circ$  açılı için FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri.

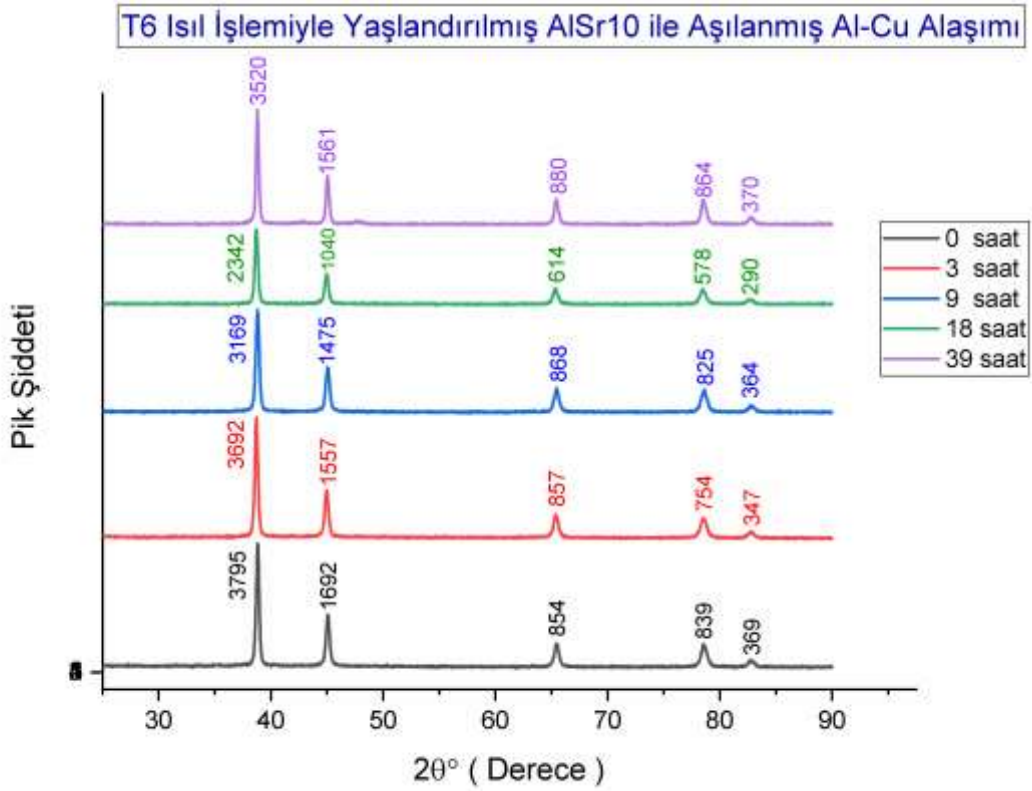
### 8.5.2. AlSr10 Girilen Al-%5Cu Alaşımının XRD İnceleme Sonuçları

Şekil 8.25'te AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde AlSr, Al<sub>4</sub>Sr ve  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiklerinin  $2\theta$  açıları ve difraksiyon kırınım düzlemleri görülmektedir.  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği başlıca;  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(100)-20.737°,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(111)-48.298°,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(200)-42.195°,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(101)-43.110°,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(210)-47.462°,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(211)-61.907°,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(311)-81.547° kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır. AlSr bileşiği; AlSr(321)-26.142°, AlSr(410)-28.842°, AlSr(411)-29.696°, AlSr(510)-35.880°, AlSr(621)-45.501° kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yansıması yapmıştır. Al<sub>4</sub>Sr bileşiği; Al<sub>4</sub>Sr(101)-21.463°, Al<sub>4</sub>Sr(110)-28.275°, Al<sub>4</sub>Sr(103)-31.440°, Al<sub>4</sub>Sr(112)-32.654°, Al<sub>4</sub>Sr(200)-40.416°, Al<sub>4</sub>Sr(105)-45.714°, Al<sub>4</sub>Sr(213)-52.081°, Al<sub>4</sub>Sr(220)-58.485°, Al<sub>4</sub>Sr(215)-62.638°, Al<sub>4</sub>Sr(312)-68.613° ve Al<sub>4</sub>Sr(323)-82.110° (hkl) kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır.



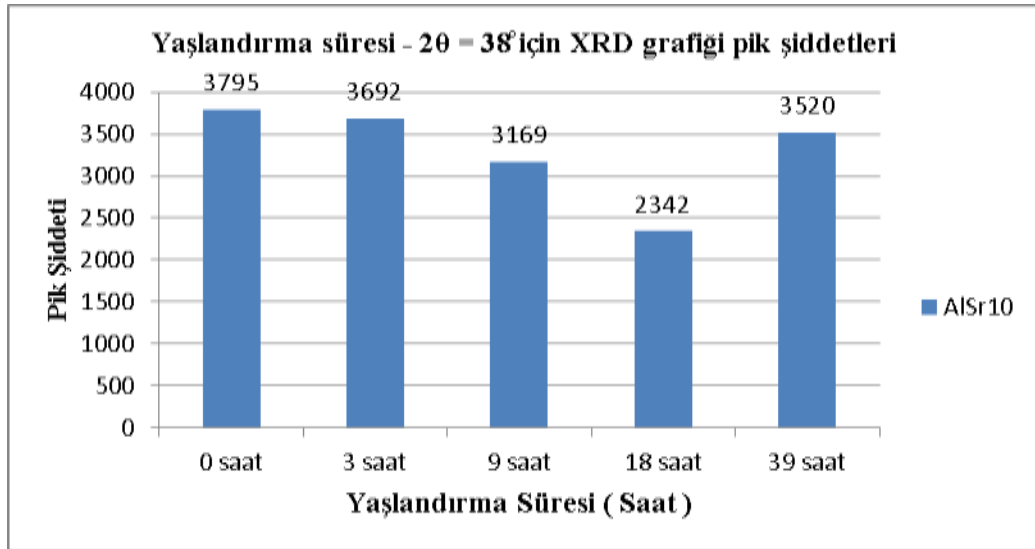
**Şekil 8.25.** AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğindeki AlSr, Al<sub>4</sub>Sr ve  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiklerinin,  $2\theta$  açıları ile (hkl) difraksiyon kırınım düzlemleri ve pik şiddetleri.

AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerindeki XRD mikro grafikleri Şekil 8.26'da görülmektedir. Al elementi (111) kristal düzlemi için  $2\theta$  açısının XRD pik yükseklikleri; 38°, 45°, 65°, 78° ve 82° derecelerinde elde edilmiştir. AlSr10 tane inceltici girilen ve yaşlandırma yapılmayan Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde, Al elementinin (111) kristal düzleminde  $2\theta$  açısının 38°'deki pik şiddeti 3795 iken, 3 saat yaşlandırma sonunda 3692 pik değerine düşmüştür. Yaşlandırma süresinin artmasıyla pik yüksekliği düşme göstererek 18 saat yaşlandırmada 2342 değerine düşmüştür. 18 saat yaşlandırmadan sonra pik yüksekliği artmaya başlamıştır. 39 saat aşırı yaşlandırmada pik yüksekliği 3520 görece değerine yükselmiştir.



**Şekil 8.26.** AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta ve 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerindeki XRD mikro grafikleri.

AlSr10 tane inceltici girilen, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı sürede yaşlandırılmış Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde Al elementinin (111) kristal düzleminde 38°deki  $2\theta$  açılarındaki piklerin şiddetlerinin, yaşlandırma sürelerine karşı değişimi Şekil 8.27'de görülmektedir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla pik şiddeti azalmaktadır. Pik şiddetindeki bu azalma 18 saat yaşlandırma süresine kadar devam etmekte ve 18 saatten sonraki yaşlandırma sürelerinde tekrar artış göstermektedir. Buna göre; yaşlandırma yapılmamış numunenin pik şiddeti 3795 iken; 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşılık bu değerler sırasıyla; 3692, 3169, 2342 ve 3520 pik şiddeti olarak elde edilmiştir.



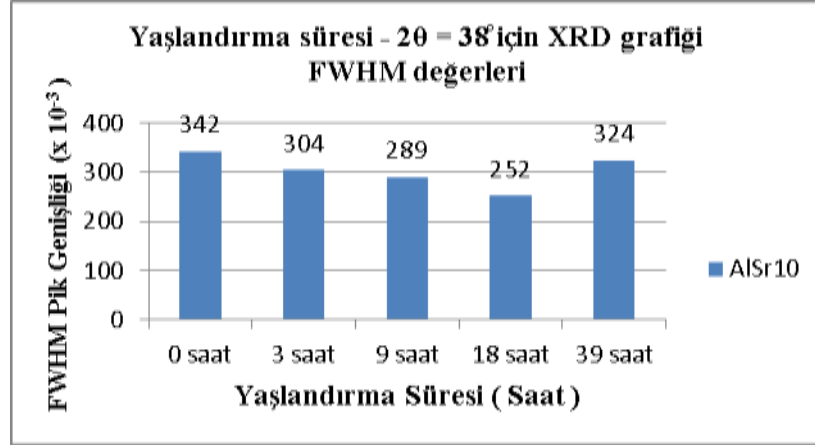
**Şekil 8.27.** XRD grafiklerinde; AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarındaki Al elementi için 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı; (111) kristal düzlemi  $2\theta = 38^\circ$  açısında piklerin şiddetleri.

Şekil 8.28'de XRD grafiklerinde; AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde Al elementinin (111) kristal düzleminde  $38^\circ$  derecedeki  $2\theta$  açılarının; 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı, FWHM (Pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri görülmektedir. Pik yüksekliğinin yarısındaki yatay genişleme, malzemenin kristal boyutuyla ilişkilidir. Pik yarı yüksekliğindeki bu genişlemenin sebepleri; alaşımın yapısında bulunan katkı maddelerinin mevcudiyeti ve kristal bozuklukları olarak gösterilebilir. Şekil 8.28'de yaşlandırma süresinin artmasıyla 18 saat yaşlandırma süresine kadar FWHM değerlerinde düşme görülmektedir. 39 saat yaşlandırmada ise nispeten yükselme görülmektedir. Yaşlandırma yapılmadığı haldeki FWHM değeri  $0.342 \mu\text{m}$  iken 3 saat yaşlandırma süresinde  $0.304 \mu\text{m}$  ve 18 saat yaşlandırma süresinde  $0.252 \mu\text{m}$  değerine düşmüştür. 39 saat aşırı yaşlandırma süresinde FWHM değeri tekrar artış göstererek  $0.324 \mu\text{m}$  değerine yükselmiştir. Çizelge 8.6'da AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının  $175^\circ\text{C}$ 'de beş farklı yaşlandırma sürelerine karşılık Al(111) kristal düzlemi için,  $2\theta=38^\circ$  açılarındaki FWHM değerlerindeki değişim görülmektedir.

**Çizelge 8.6** AlSr10 tane inceltici girilmiş Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde,  $175^\circ\text{C}$ 'deki farklı yaşlandırma sürelerine karşılık,  $2\theta=38^\circ$  için Al (111) kristal düzlemlerindeki FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri.

Yaşlandırma Süresi (Saat)	0	3	9	18	39
FWHM Değerleri ( $\mu\text{m}$ )	0,342	0,304	0,289	0,252	0,324



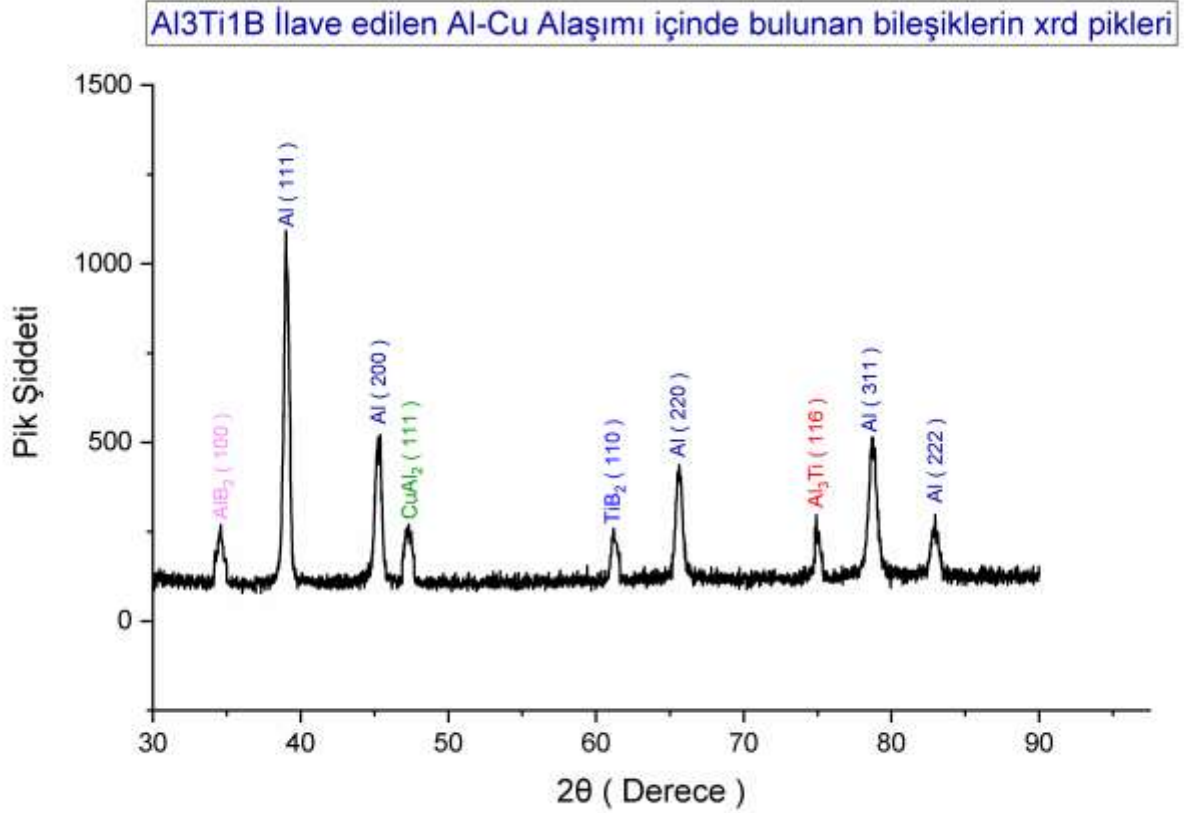


**Şekil 8.28.** XRD grafiklerinde; AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımındaki Al (111) kristal düzlemi için 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı,  $2\theta = 38^\circ$  açıları için FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri.

### 8.5.3. Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B Girilen Al-%5Cu Alaşımının XRD İnceleme Sonuçları

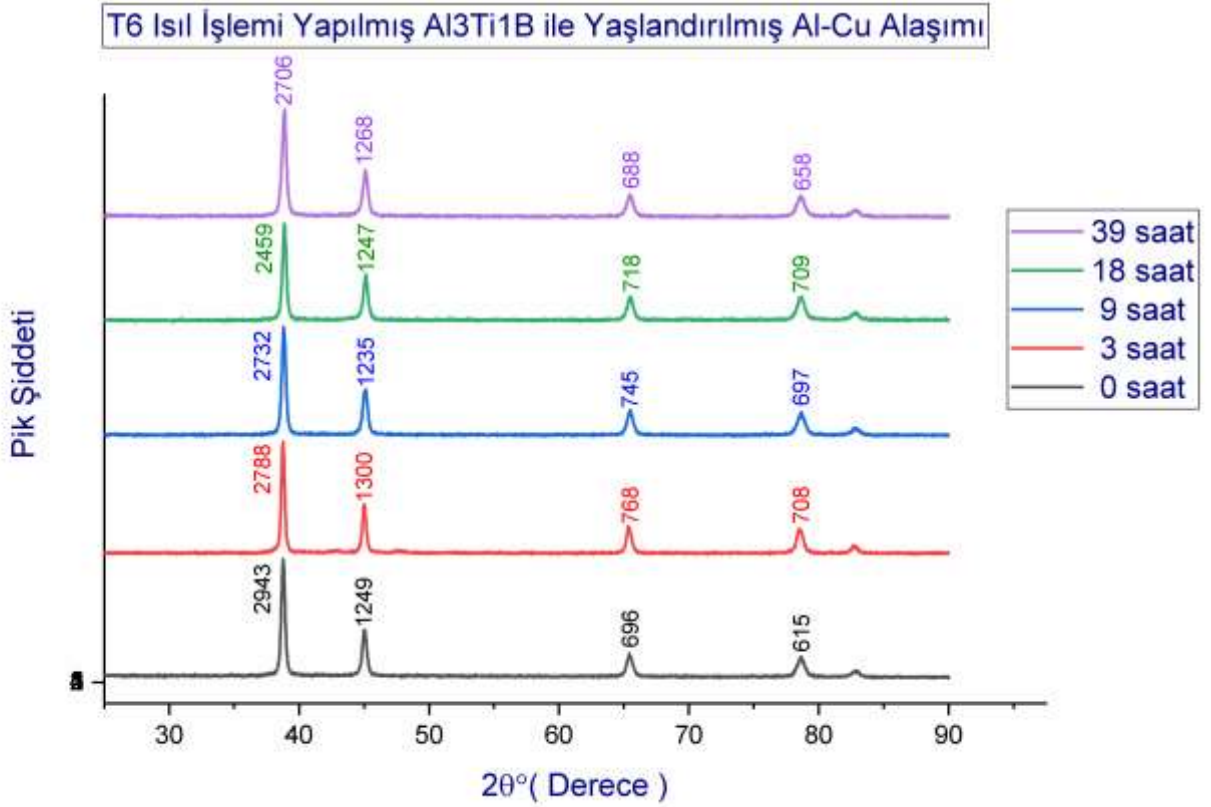
Şekil 8.29'da Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde Al elementi ile Al<sub>3</sub>Ti, TiB<sub>2</sub> ve  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiklerinin  $2\theta$  açıları ve (hkl) difraksiyon kırınım düzlemleri görülmektedir. Al elementi; Al(111)- $38.610^\circ$ , Al(200)- $44.833^\circ$ , Al(220)- $65.186^\circ$ , Al(311)- $78.306^\circ$ , Al(222)- $82.352^\circ$  kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik vermiştir. Al<sub>3</sub>Ti bileşiği başlıca; Al<sub>3</sub>Ti(101)- $25.391^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(103)- $39.235^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(004)- $42.092^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(200)- $47.306^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(204)- $65.156^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(301)- $75.007^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(312)- $82.489^\circ$  kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır. TiB<sub>2</sub> bileşiği; TiB<sub>2</sub>(001)- $27.608^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(100)- $34.151^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(101)- $44.463^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(002)- $57.006^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(110)- $61.139^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(102)- $68.154^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(201)- $78.674^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(112)- $88.439^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(211)- $108.719^\circ$  kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır.  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği başlıca;  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(100)- $20.737^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(200)- $42.195^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(101)- $43.110^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(210)- $47.462^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(111)- $48.298^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(211)- $61.907^\circ$  ve  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(311)- $81.547^\circ$  (hkl) kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yansıması yapmıştır.





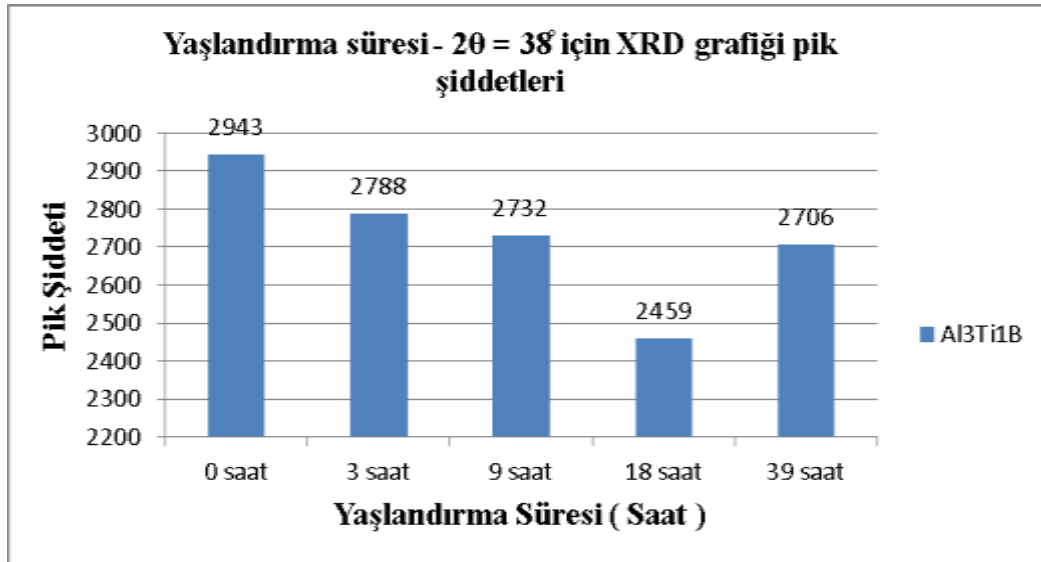
Şekil 8.29. Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B Tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğindeki, Al<sub>3</sub>Ti, AlB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub> ve θ-Al<sub>2</sub>Cu bileşiklerinin, 2θ açıları ile XRD difraksiyon kırınım düzlemleri ve pikleri.

Şekil 8.30'da Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 535°C'de 4 saat çözeltiliye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerindeki XRD grafikleri görülmektedir. Al elementi (111) kristal düzlemi için 2θ açısının XRD pik yükseklikleri; 38°, 45°, 65°, 78° ve 82° derecelerinde elde edilmiştir. Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen ve yaşlandırma yapılmayan Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde, Al elementinin (111) kristal düzleminde 2θ açısının 38°deki pik şiddeti 2943 pik yüksekliğine sahip iken 3 saat yaşlandırmada 2788 pik değerine düşmüştür. Yaşlandırma süresinin artmasıyla pik yüksekliği düşme göstererek 18 saat yaşlandırmada 2459 değerine düşmüştür. 18 saat yaşlandırmadan sonra pik yüksekliği artmaya başlamıştır. 39 saat aşırı yaşlandırmada pik yüksekliği 2706 değerine yükselmiştir.



**Şekil 8.30.** Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta ve 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerindeki XRD mikro grafikleri.

Şekil 8.31'de Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı sürede yaşlandırılan Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde Al elementinin (111) kristal düzleminde 38°deki 2θ açılarındaki piklerin şiddetlerinin, yaşlandırma sürelerine karşı değişimi görülmektedir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla pik şiddeti azalmaktadır. Pik şiddetindeki bu azalma 18 saat yaşlandırma süresine kadar devam etmekte ve 18 saatten sonraki yaşlandırma sürelerinde tekrar artış göstermektedir. Buna göre; yaşlandırma yapılmamış numunenin pik şiddeti 2943 iken, sırasıyla bu değerler 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşılık; 2788, 2732, 2459 ve 2706 nisbi pik şiddeti değerleri elde edilmiştir.

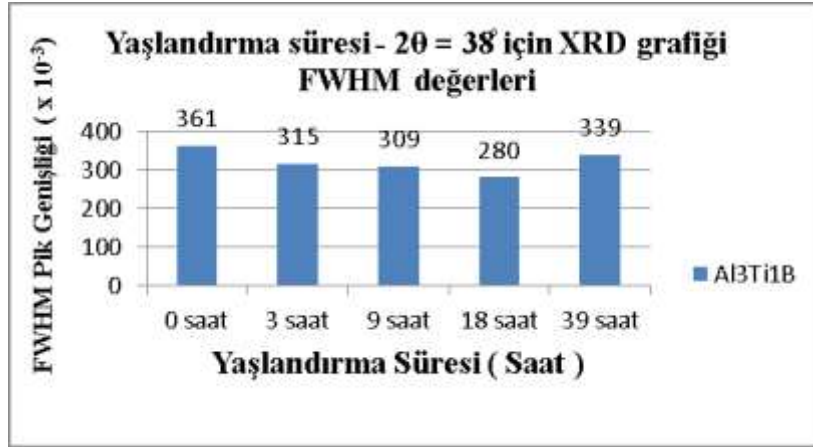


**Şekil 8.31.** XRD grafiğinde Al3Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımındaki Al elementi için 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı; Al (111) kristal düzleminin  $2\theta = 38^\circ$  açılarındaki piklerin şiddetleri.

Şekil 8.32’de Al3Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının XRD grafiğinde Al(111) kristal düzleminde  $38^\circ$  derecedeki  $2\theta$  açılarının; 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı, FWHM (Pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri görülmektedir. Pik yüksekliğinin yarısındaki yatay genişleme, malzemenin kristal boyutuyla ilgilidir. Pik yarı yüksekliğindeki bu genişlemenin sebepleri; alaşımın yapısında bulunan katkı maddelerinin mevcudiyeti ve kristal bozuklukları olarak gösterilebilir. Şekil 8.32’de yaşlandırma süresinin artmasıyla FWHM genişlik değerlerinde düşme görülmektedir. 39 saat yaşlandırmada ise nispeten yükselme görülmektedir. Yaşlandırma yapılmadığı haldeki FWHM değeri  $0.361 \mu\text{m}$  iken 3 saat yaşlandırma süresinde  $0.315 \mu\text{m}$  ve 18 saat yaşlandırma süresinde  $0.280 \mu\text{m}$  değerine düşmüştür. 39 saat aşırı yaşlandırma süresinde FWHM değeri tekrar artış göstererek  $0.339 \mu\text{m}$  değerine yükselmiştir. Çizelge 8.7’de Al3Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının  $175^\circ\text{C}$ ’de beş farklı yaşlandırma sürelerine karşılık, Al(111) kristal düzlemi için,  $2\theta=38^\circ$  açılarındaki FWHM değerlerindeki değişim görülmektedir.

**Çizelge 8.7** Al3Ti1B tane inceltici girilmiş Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde,  $175^\circ\text{C}$ ’deki farklı yaşlandırma sürelerine karşılık,  $2\theta=38^\circ$  için Al(111) kristal düzlemlerindeki FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri.

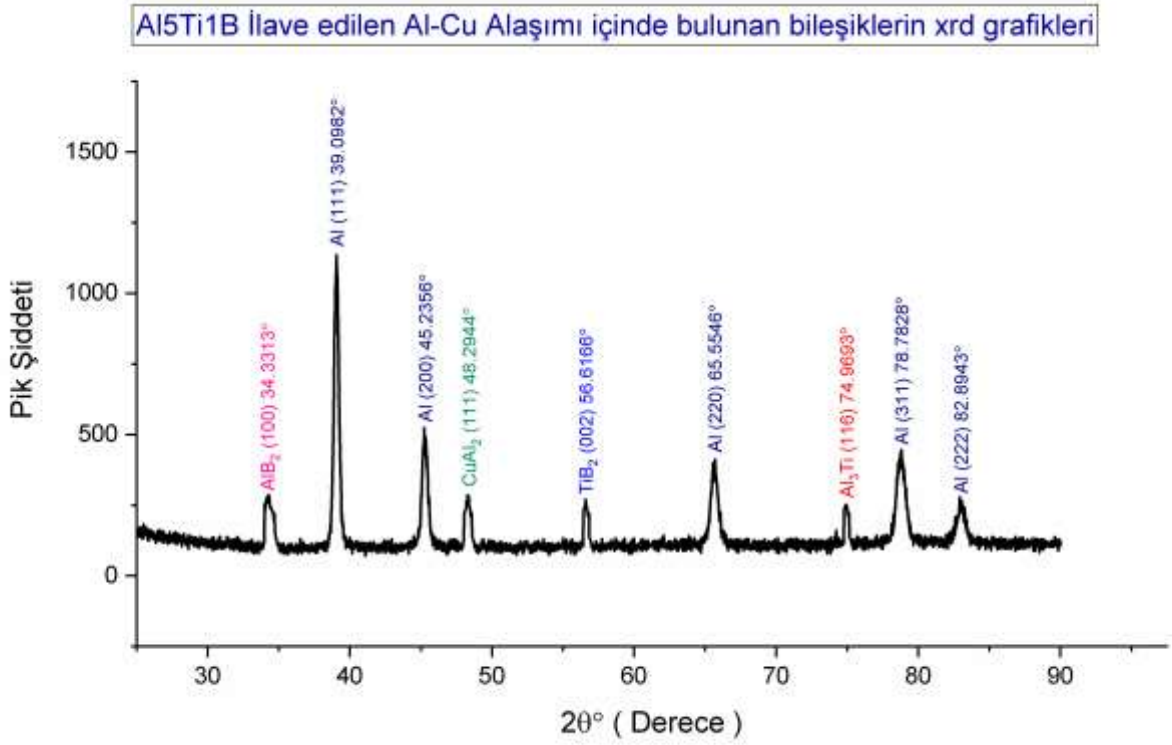
Yaşlandırma Süresi (Saat)	0	3	9	18	39
FWHM Değerleri ( $\mu\text{m}$ )	0,361	0,315	0,309	0,280	0,339



**Şekil 8.32.** XRD grafiklerinde; Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımındaki Al (111) kristal düzlemi için 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı,  $2\theta = 38^\circ$  açıları için FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri.

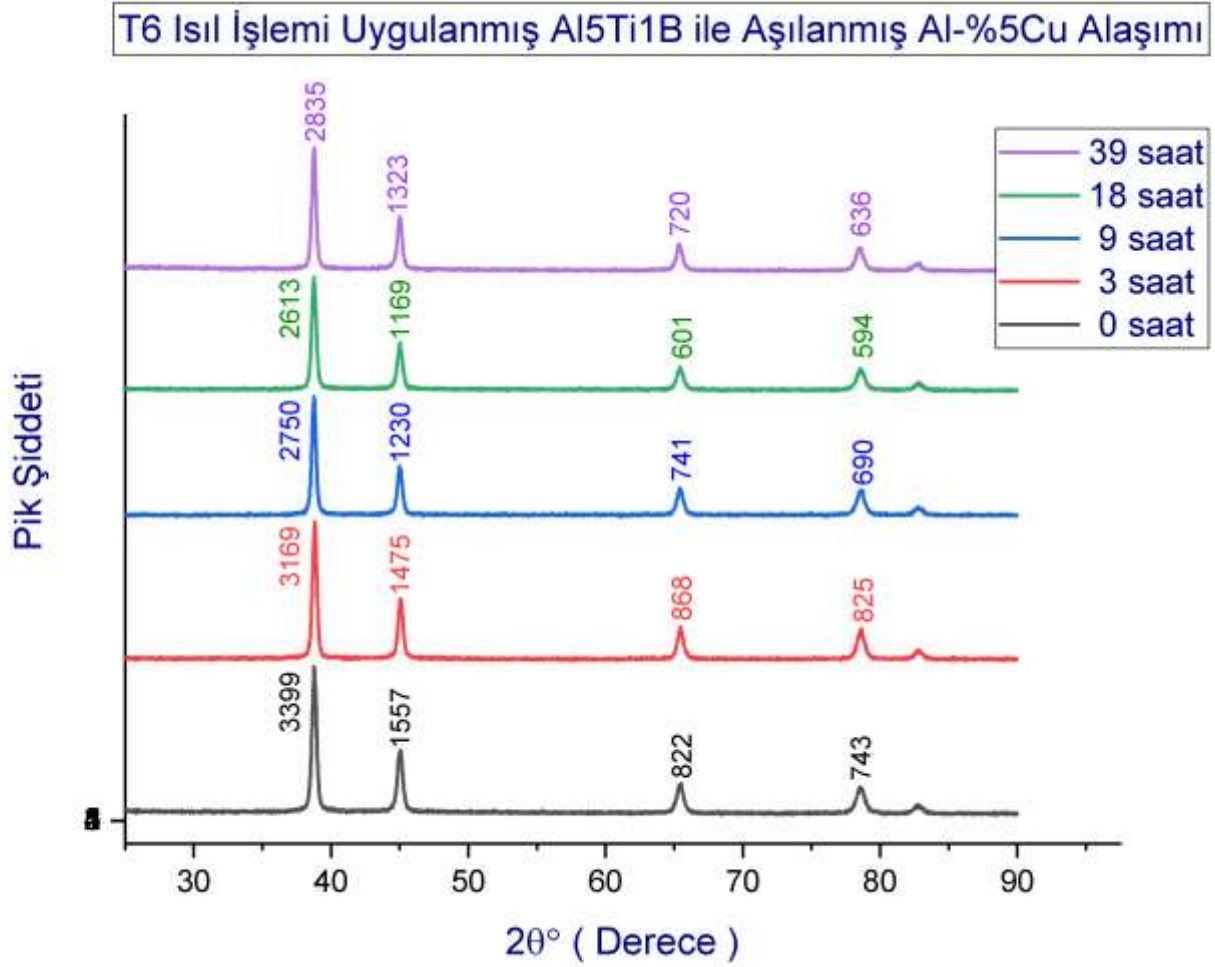
#### 8.5.4. Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B Girilen Al-%5Cu Alaşımının XRD İnceleme Sonuçları

Şekil 8.33'te Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde Al elementi ile  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu, AlB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve TiB<sub>2</sub> bileşiklerinin (hkl) kristal düzlemleri ve  $2\theta$  XRD kırınım açıları görülmektedir. Buna göre Al elementi başlıca; Al(111)- $38.610^\circ$ , Al(200)- $44.833^\circ$ , Al(220)- $65.186^\circ$ , Al(311)- $78.306^\circ$  ve Al(222)- $82.352^\circ$  kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır.  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği;  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(100)- $20.737^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(200)- $42.195^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(101)- $43.110^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(210)- $47.462^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(111)- $48.298^\circ$ ,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(211)- $61.907^\circ$  ve  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu(311)- $81.547^\circ$  kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır. AlB<sub>2</sub> bileşiği; AlB<sub>2</sub>(001)- $27.318^\circ$ , AlB<sub>2</sub>(100)- $34.387^\circ$ , AlB<sub>2</sub>(101)- $44.462^\circ$ , AlB<sub>2</sub>(002)- $56.366^\circ$ , AlB<sub>2</sub>(110)- $61.594^\circ$ , AlB<sub>2</sub>(201)- $79.081^\circ$ , AlB<sub>2</sub>(112)- $88.304^\circ$  ve AlB<sub>2</sub>(211)- $109.564^\circ$  (hkl) kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır. Al<sub>3</sub>Ti bileşiği başlıca; Al<sub>3</sub>Ti(002)- $20.688^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(101)- $25.391^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(112)- $39.235^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(004)- $42.092^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(200)- $47.306^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(006)- $65.156^\circ$ , Al<sub>3</sub>Ti(116)- $75.007^\circ$  ve Al<sub>3</sub>Ti(107)- $82.489^\circ$  kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır. TiB<sub>2</sub> bileşiği başlıca; TiB<sub>2</sub>(001)- $27.608^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(100)- $34.151^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(101)- $44.463^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(002)- $57.006^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(110)- $61.139^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(102)- $68.154^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(201)- $78.674^\circ$ , TiB<sub>2</sub>(112)- $88.439^\circ$  ve TiB<sub>2</sub>(211)- $108.719^\circ$  kristal düzlemlerinde ve  $2\theta$  açılarında pik yapmıştır.



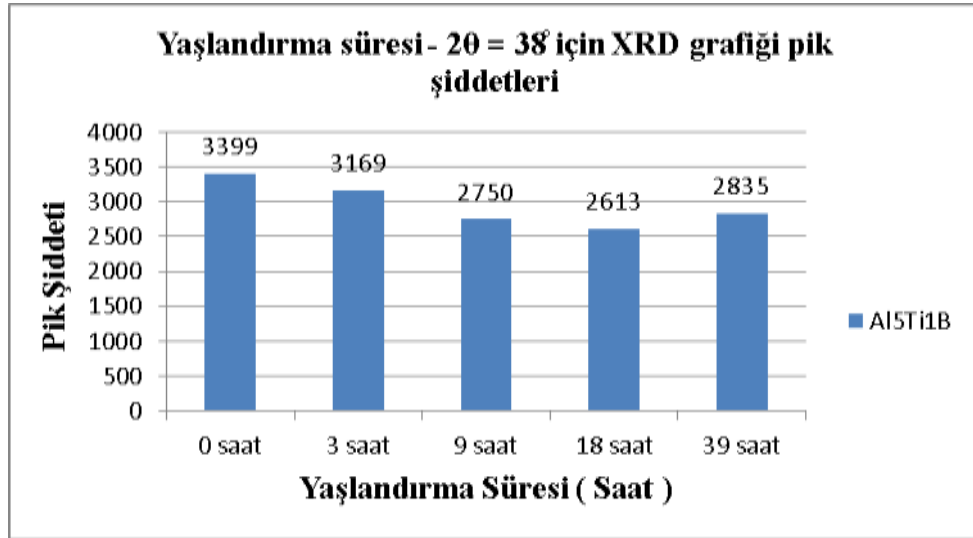
**Şekil 8.33.** Al5Ti1B Tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğindeki Al<sub>3</sub>Ti, AlB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub> ve θ-Al<sub>2</sub>Cu bileşiklerinin, 2θ açıları ile XRD difraksiyon kırınım düzlemleri ve pikleri.

Şekil 8.34'te Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerindeki XRD grafikleri görülmektedir. Al elementi [hkl] (111) kristal düzlemi için 2θ açısının XRD pik yükseklikleri; 38°, 45°, 65°, 78° ve 82° derecelerinde elde edilmiştir. Al5Ti1B tane inceltici girilen ve yaşlandırma yapılmayan Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde, Al(111) kristal düzleminde 2θ açısının 38°'deki pik şiddeti 3399 pik yüksekliğine sahip iken 3 saat yaşlandırmada 3169 pik değerine düşmüştür. Yaşlandırma süresinin artmasıyla pik yüksekliği düşme göstererek 18 saat yaşlandırmada 2613 değerine düşmüştür. 18 saat yaşlandırmadan sonra pik yüksekliği artmaya başlamıştır. 39 saat aşırı yaşlandırmada pik yüksekliği artarak 2835 değerine yükselmiştir.



**Şekil 8.34.** Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta ve 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerindeki XRD mikro grafikleri.

Şekil 8.35'te Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen, 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat gibi beş farklı sürede yaşlandırılan Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde Al(111) kristal düzleminde 38°'deki 2θ açılarındaki piklerin şiddetlerinin, yaşlandırma sürelerine karşı değişimi görülmektedir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla pik şiddeti azalmaktadır. Pik şiddetindeki bu azalma 18 saat yaşlandırma süresine kadar devam etmekte ve 18 saatten sonraki yaşlandırma sürelerinde tekrar artış göstermektedir. Buna göre; yaşlandırma yapılmamış numunenin pik şiddeti 3399 iken, sırasıyla bu değerler 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşılık; 3169, 2750, 2613 ve 2835 görece pik şiddeti değerleri bulunmuştur.



**Şekil 8.35.** XRD grafiğinde Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımındaki Al elementi için 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı; Al(111) kristal düzleminin  $2\theta = 38^\circ$  açılarındaki piklerin şiddetleri.

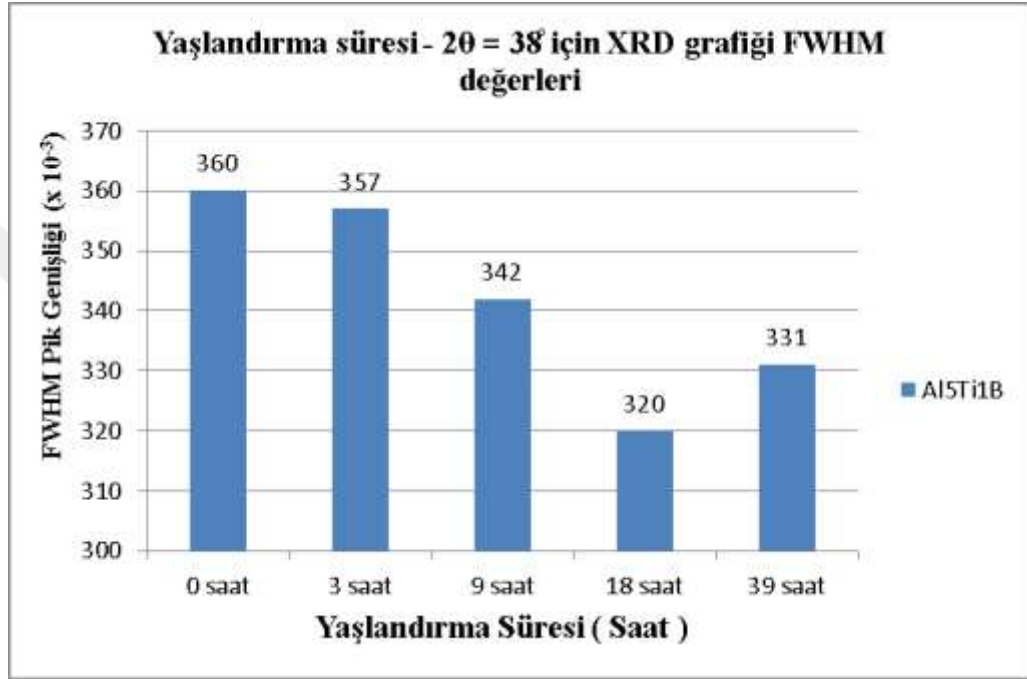
Şekil 8.36'da Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının XRD grafiğinde Al(111) kristal düzleminde  $38^\circ$  derecedeki  $2\theta$  açılarının; 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı, FWHM (Pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri görülmektedir.

Pik yüksekliğinin yarısındaki yatay genişleme, malzemenin kristal boyutuyla ilişkilidir. Pik yarı yüksekliğindeki bu genişlemenin sebepleri; alaşımın yapısında bulunan katkı maddelerinin mevcudiyeti ve kristal bozuklukları olarak gösterilebilir. Şekil 8.36'da yaşlandırma süresinin artmasıyla FWHM genişlik değerlerinde düşme görülmektedir. 39 saat yaşlandırmada ise nispeten yükselme görülmektedir. Yaşlandırma yapılmadığı haldeki FWHM değeri  $0.360 \mu\text{m}$  iken 3 saat yaşlandırma süresinde  $0.357 \mu\text{m}$  ve 18 saat yaşlandırma süresinde  $0.320 \mu\text{m}$  değerine düşmüştür. 39 saat aşırı yaşlandırma süresinde FWHM değeri tekrar artış göstererek  $0.331 \mu\text{m}$  değerine yükselmiştir. Çizelge 8.8'de Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının  $175^\circ\text{C}$ 'de beş farklı yaşlandırma sürelerine karşılık, Al(111) kristal düzlemi için,  $2\theta=38^\circ$  açılarındaki FWHM değerlerindeki değişim görülmektedir.



**Çizelge 8.8** Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilmiş Al-%5Cu alaşımının XRD grafiğinde, 175°C'deki farklı yaşlandırma sürelerine karşılık,  $2\theta=38^\circ$  için Al(111) kristal düzlemlerindeki FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri.

Yaşlandırma Süresi (Saat)	0	3	9	18	39
FWHM Değerleri ( $\mu\text{m}$ )	0,360	0,357	0,342	0,320	0,331



**Şekil 8.36.** XRD grafiklerinde; Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımındaki Al(111) kristal düzlemi için 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırma sürelerine karşı,  $2\theta = 38^\circ$  açılı için FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri.



## 8.6. MEKANİK ÖZELLİKLER

### 8.6.1. Brinell Sertlik Analiz Sonuçları

Sertlik ölçümleri dört alaşım grubuna yapılmıştır. Bunlar; tane inceltici girilmemiş Al-5%Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilmiş olan Al-%5Cu alaşımlarıdır. Bu numunelere 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme ve 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı sürelerde yapay yaşlandırma uygulanmıştır. Yaşlandırma süresinin artışıyla doğru orantılı olarak Brinell sertlik değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Ayrıca tane inceltici girilmeyen alaşımın sertlik değerleri en düşük iken, en fazla sertlik değerleri Al5Ti1B tane inceltici master alaşımı girilen malzemede görülmüştür. Çizelge 8.9’da dört farklı Al-%5Cu alaşımlarının 175°C’de farklı yaşlandırma sürelerinde elde edilen Brinell sertlik değerleri görülmektedir.

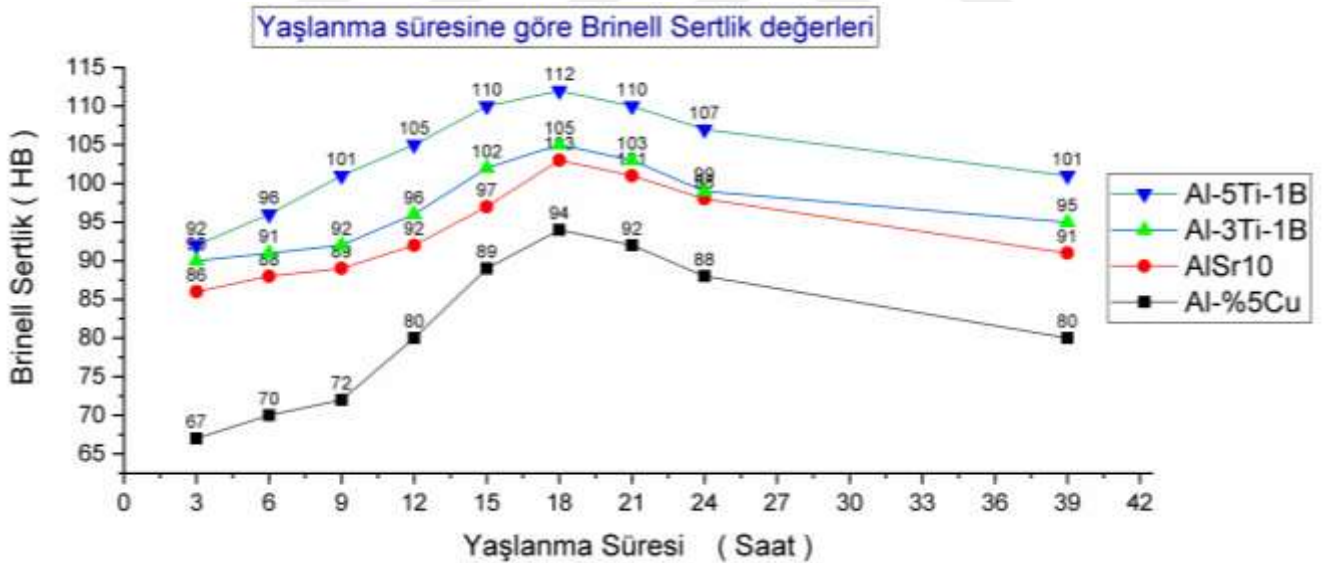
Bu çizelgeye göre Brinell sertlik değerlerinin sırasıyla, tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımlarında, artmakta olduğu görülmektedir. Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı 175°C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırmadan sonra 67 HB sertlik değerinden, 18 saat yaşlandırmada 94 HB sertlik değerine %28’lik bir yükselme göstermiştir. AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımı 175°C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırmadan sonra 86 HB sertlik değerinden, 18 saat yaşlandırmada 103 HB sertlik değerine %19’luk bir yükselme göstermiştir. Al3Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımı 175°C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırmadan sonra 90 HB sertlik değerinden, 18 saat yaşlandırmada 105 HB sertlik değerine %16’lık bir yükselme göstermiştir. Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımı 175°C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırmadan sonra 92 HB sertlik değerinden, 18 saat yaşlandırmada 112 HB sertlik değerine %21’lik bir yükselme göstermiştir. Şekil 8.37’de dört farklı alüminyum alaşımının 175°C’de farklı yaşlandırma sürelerindeki Brinell sertlik değerlerinin karşılaştırması görülmektedir.

Alüminyum alaşımlarının aşırı yaşlandırma sürecindeki sertlik değerlerini görmek amacıyla seçilen numuneler 39 saat yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuşlardır. Daha sonra bu numunelerin sertlik değerleri ölçülerek aşırı yaşlanma ve tane kabalaşması tespit edilmiştir. Buna göre; her dört farklı alüminyum alaşımlarının Brinell sertlik değerleri 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saatlik yaşlandırma sürelerinde artış göstermişler ve takibinde 18 saatlik yaşlandırmadan sonra ise sertlik değerlerinde azalma meydana

gelmiştir. En yüksek sertlik değeri Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 18 saat yaşlandırılması neticesinde 112 HB olarak elde edilmiştir. 18 saat yaşlandırmadan sonra sertlik değerlerindeki azalma 39 saat yaşlandırma süresine kadar takip edilmiş ve yaklaşık %10'luk bir azalma göstererek 101HB değerine düşmüştür.

**Çizelge 8.9** Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı ile AlSr10, Al-3Ti-1B ve Al-5Ti-1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarına; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta 39 saat aşırı yaşlanma uygulandıktan sonraki Brinell sertlik değerleri

Yaşlanma Süresi - Brinell Sertlik Değerleri (HB)									
Yaşlandırma Süresi	3 saat	6 saat	9 saat	12 saat	15 saat	18 saat	24 saat	29 saat	39 saat
Al-%5Cu alaşımı	67	70	72	80	89	<b>94</b>	92	88	80
AlSr10 ile aşlanmıştır	86	88	89	92	97	<b>103</b>	101	98	91
Al-3Ti-1B ile aşlanmıştır	90	91	92	96	102	<b>105</b>	103	99	95
Al-5Ti-1B ile aşlanmıştır	92	96	101	105	110	<b>112</b>	110	107	101



**Şekil 8.37** Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı ile AlSr10, Al-3Ti-1B ve Al-5Ti-1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarına; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta 39 saat aşırı yaşlanma uygulandıktan sonraki Brinell sertlik değerleri.

### 8.6.2. Çekme Deneylerinin Sonuçları

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşıl原因ıcıları girilerek toplamda dört farklı grup halinde Al-%5Cu alaşımlarının

dökümleri yapılmıştır. Bu alaşımlardan hazırlanan çekme çubuk numunelerine; 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme işlemi uygulandıktan sonra 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır.

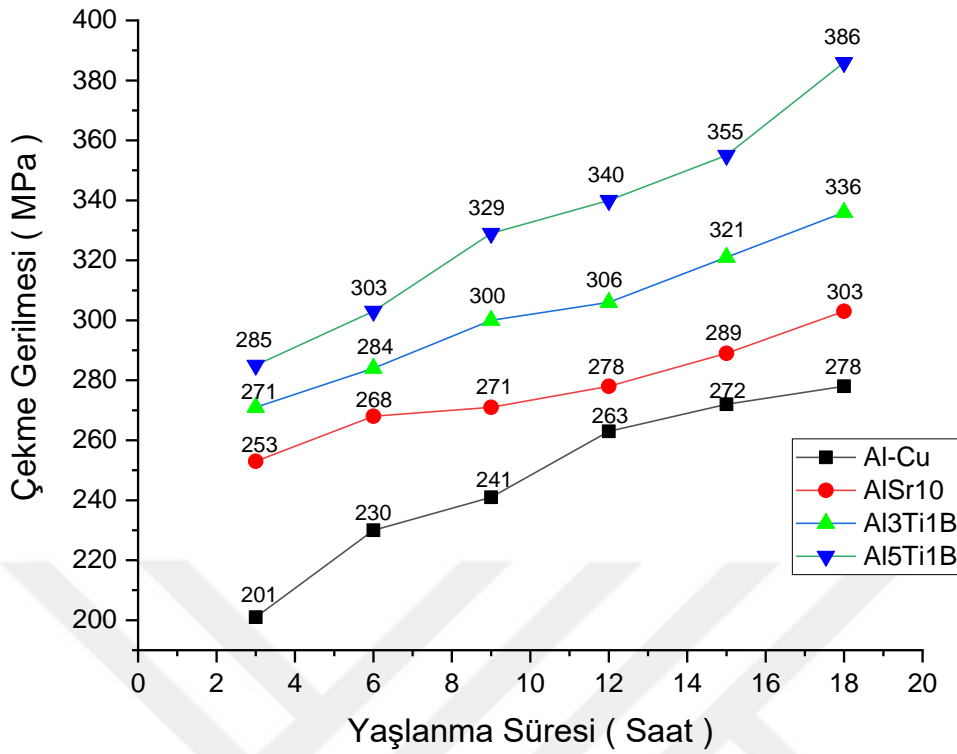
Çizelge 8.10'da tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen dört farklı Al-%5Cu alaşımlarının, 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi altı farklı yaşlandırma sürelerindeki çekme gerilmeleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. 175°C sıcaklıkta yaşlanma süresindeki artışla çekme dayanımlarında da artış görülmektedir. Şekil 8.38'de 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme işlemi uygulandıktan sonra 175°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine karşılık AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B gibi farklı tane inceltici master alaşımları girilen Al-%5Cu alaşımlarının çekme dayanımları görülmektedir. Buna göre, 175°C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırma sonucunda, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımlarının çekme dayanımları sırasıyla; 201 MPa, 253 MPa, 271 MPa ve 285 MPa olarak bulunmuştur. AlSr10 tane inceltici girilen alaşımın çekme dayanımı, tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımına göre daha yüksektir. Diğer yandan Al3Ti1B tane inceltici girilen alaşımın çekme dayanımı da AlSr10 tane inceltici girilen alaşımın çekme dayanımından daha yüksektir. 3 saatlik yaşlandırma süresinde en yüksek çekme dayanımı Al5Ti1B tane inceltici girilen alaşımda 285 MPa olarak elde edilmiştir. Son iki grupta aşılایıcıların B elementi miktarları eşit olduğundan Al5Ti1B tane inceltici girilen alaşımın çekme dayanımının daha yüksek olması Ti elementinin tane boyutu inceltmede daha etkili olduğunu gösterir. 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma süresi sonucunda, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen alaşımların çekme dayanımları sırasıyla; 278 MPa, 303 MPa, 336 MPa ve 386 MPa olarak bulunmuştur.

Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alüminyum alaşımının 3 saatlik yaşlanma süresindeki 201 MPa olan çekme dayanımı, 18 saat yaşlanma süresi sonunda 278 MPa değerine yükselmiştir. AlSr10 tane inceltici girilen Al-%5Cu alüminyum alaşımının 3 saatlik yaşlanma süresindeki 253 MPa olan çekme dayanımı, 18 saat yaşlanma süresi sonunda 303 MPa değerine yükselmiştir. Aynı şekilde Al3Ti1B tane inceltici girilen alüminyum alaşımının 3 saatlik yaşlanma süresindeki 271 MPa olan çekme dayanımı, 18 saat yaşlanma süresi sonunda 336 MPa değerine yükselmiştir. Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alüminyum alaşımının 3 saatlik yaşlanma süresindeki 285 MPa olan

çekme dayanımı, 18 saat yaşlanma süresi sonunda 386 MPa değerine yükselmiştir. Böylece en yüksek çekme gerilmesi 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma süresinde Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımında 386 MPa olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 8.10.** 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme işlemi uygulandıktan sonra 175°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine karşılık farklı tane inceltici master alaşımları girilen Al-%5Cu alaşımlarının **Çekme Dayanımlarının** karşılaştırılması

Yaşlandırma Süreleri (Saat)	Çekme Dayanımı değerleri (MPa)					
	3 saat	6 saat	9 saat	12 saat	15 saat	18 saat
Al-%5Cu Alaşımı	201	230	241	263	272	278
Al-%5Cu + AlSr10	253	268	271	278	289	303
Al-%5Cu + Al-3%Ti-1%B	271	284	300	306	321	336
Al-%5Cu + Al-5%Ti-1%B	285	303	329	340	355	386



**Şekil 8.38** 535<sup>0</sup>C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25<sup>0</sup>C'de suda su verme işlemi uygulandıktan sonra 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine karşılık farklı tane inceltici master alaşımları girilen Al-%5Cu alaşımlarının çekme dayanımları.

Şekil 8.38'e göre Al-%5Cu alaşımının 3 saatlik yaşlanmada 201 MPa olan çekme dayanımı, AlSr10 ile aşılandığında %25'lik artışla 253 MPa değerine çıkmıştır. 3 saatlik yaşlanmada Al3Ti1B ile aşılanan Al-Cu alaşımının çekme dayanımı %34'lük bir artışla 271 MPa değerine ulaşmıştır. Aynı şekilde 3 saatlik yaşlanmada Al5Ti1B ile aşılanan Al-Cu alaşımının çekme dayanımı %41'lik bir artışla 285 MPa değerine yükselmiştir. 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırılan Al-%5Cu alaşımının 201 MPa olan çekme dayanımı, 18 saat yaşlandırma sonunda %38 oranında bir artış ile 278 MPa değerine yükselmiştir. AlSr10 ile aşılanan Al-Cu alaşımının 3 saat yaşlandırmada 253 MPa olan çekme dayanımı, 18 saat yaşlandırma sonunda %19 oranında bir artış ile 303 MPa değerine çıkmıştır. Al3Ti1B ile aşılanan Al-Cu alaşımının 3 saat yaşlandırmada 271 MPa olan çekme dayanımı, 18 saat yaşlandırma sonucunda %23 oranında bir artışla 336 MPa değerine ulaşmıştır. Al5Ti1B ile aşılanan Al-Cu alaşımının 3 saat yaşlandırma sonunda 285 MPa olan çekme dayanımı, 18 saat yaşlandırma sonunda %35 oranında bir artış göstererek 386 MPa değerine yükselme göstermiştir.

Sonuç olarak Al-%5Cu alaşımı için en yüksek çekme dayanımı, Al5Ti1B tane inceltici ile aşılansarak, 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma sonucunda 386 MPa maksimum değeri olarak elde edilmiştir.

### 8.6.3. Akma Deneylerinin Sonuçları

Çekme deneyinde elde edilen Akma gerilmesi değeri, malzemenin mukavemet ve süneklik özelliklerini kıyaslama imkânı verir. Gerilim-Birim şekil değişimi grafiğinde, plastik deformasyon bölgesi geniş olan malzemeler, yüksek birim şekil değişimine sahip olduklarından şekillendirilmeleri kolaydır. Bu tür malzemelere “sünek malzeme” denilir. Diğer yandan, plastik deformasyon bölgesi küçük olan malzemelerin, elastik deformasyondan sonra çok az kalıcı deformasyon göstererek kırılacağı anlaşılır. Bu tür malzemeler ise “gevrek malzeme” olarak ifade edilir.

Sünek malzemeler, çekme deneyinin sonunda plastik deformasyon göstererek kopar. Kopma bölgesi aynı zamanda boyun verme bölgesi olarak görülür. Gevrek malzemeler ya çok az plastik deformasyon gösterir ya da plastik deformasyon göstermeden koparlar. Gerilme-birim şekil değişimi grafiğindeki eğrilerden elde edilen bir diğer önemli bilgi ise, malzemelere ait deformasyon sertleşmesi karakteristiğidir. Malzemelere uygulanan plastik deformasyon sonucunda malzemenin sertliğinin artmasına “Deformasyon Sertleşmesi” denilir. Bu deformasyon sertleşmesinin hızı, malzemenin homojen deformasyon bölgesinin eğimiyle doğrudan ilişkilidir. Homojen deformasyon bölgesinin eğimi eğer yüksek ise bu malzemeler, yüksek deformasyon sertleşme kabiliyetine sahiptir. Deformasyon sertleşme kabiliyeti düşük olan malzemelerin homojen plastik deformasyon bölgeleri nispeten düz bir görünüme sahiptir (Ders Notları, 2016).

Bu çalışmada tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B olarak üç farklı aşılavıcı girilerek toplamda dört farklı grup halinde Al-%5Cu alaşımlarının dökümleri yapılmıştır. Bu alaşımlardan hazırlanan çekme çubuk numunelerine; 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiyeye alma, 25°C’de suda su verme işlemi uygulandıktan sonra 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat olarak altı farklı yaşlandırma sürelerinde T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır.

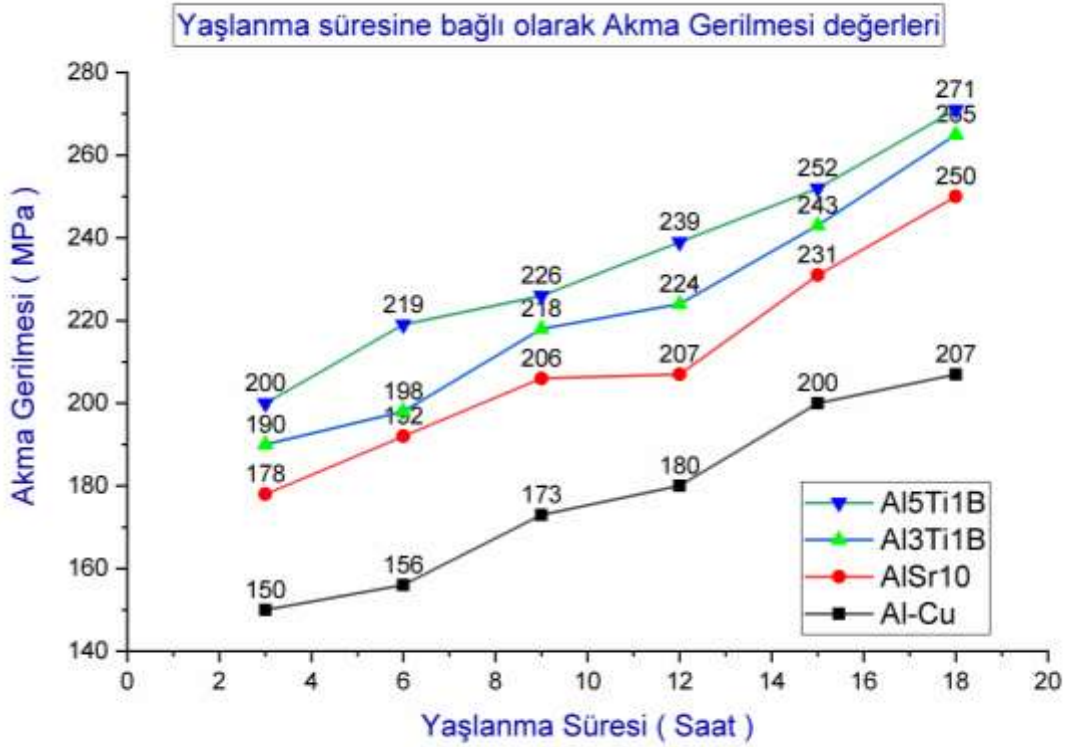
Çizelge 8.11’de tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen dört farklı Al-Cu alaşımlarının, 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi altı farklı yaşlandırma sürelerindeki akma gerilimleri

karşılaştırmalı olarak verilmiştir. 175°C sıcaklıkta yaşlanma süresindeki artışla akma dayanımlarında da artış görülmektedir.

Şekil 8.39'da 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltilme, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta altı farklı yaşlandırma sürelerindeki Al-%5Cu alaşımlarının Akma dayanımları görülmektedir. Buna göre, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B girilen Al-Cu alaşımlarının 175°C'de 3 saat yaşlandırma süresi sonunda elde edilen akma dayanımları sırasıyla; 150 MPa, 178 MPa, 190 MPa ve 200 MPa olarak bulunmuştur. AlSr10 tane inceltici girilen alaşımın Akma dayanımı, tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımına göre daha yüksektir. Diğer yandan Al3Ti1B tane inceltici girilen alaşımın Akma dayanımı da AlSr10 tane inceltici girilen alaşımın Akma dayanımından daha yüksektir. 175 °C sıcaklıkta 3 saatlik yaşlandırma süresinde en yüksek akma dayanımı Al5Ti1B tane inceltici girilen alaşımda 200 MPa olarak elde edilmiştir. Son iki grupta aşılmalıların B elementi miktarları eşit olduğundan Al5Ti1B tane inceltici girilen alaşımın akma dayanımının daha yüksek olması, alaşıma ilave edilen titanyum oranının artması, tane boyutu inceltmede etkisini artırmıştır. 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma süresi sonucunda, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımlarının akma dayanımları sırasıyla; 207 MPa, 250 MPa, 265 MPa ve 271 MPa olarak bulunmuştur.

**Çizelge 8.11.** 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltilme, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine karşılık farklı tane inceltici mastır alaşımları girilen Al-%5Cu alaşımlarının **Akma Dayanımlarının** karşılaştırılması

Yaşlandırma Süreleri (Saat)	Akma Dayanımı Değerleri (MPa)					
	3	6	9	12	15	18
Al-%5Cu Alaşımı	150	156	173	180	200	207
Al-%5Cu + AlSr10	178	192	206	207	231	250
Al-%5Cu + Al-3%Ti-1%B	190	198	218	224	243	265
Al-%5Cu + Al-5%Ti-1%B	200	219	226	239	252	271



**Şekil 8.39** 535 °C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25 °C'de suda su verme, 175 °C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine karşılık AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşıl原因an Al-Cu alaşımlarının **Akma dayanımları** görülmektedir.

Şekil 8.39'a göre Al-%5Cu alaşımının 3 saatlik yaşlanmada 150 MPa olan akma dayanımı, AlSr10 ile aşılandığında %18'lik artışla 178 MPa değerine çıkmıştır. 3 saatlik yaşlanmada Al3Ti1B ile aşıl原因an Al-Cu alaşımının akma dayanımı %26'lık bir artışla 190 MPa değerine ulaşmıştır. Aynı şekilde 3 saatlik yaşlanmada Al5Ti1B ile aşıl原因an Al-Cu alaşımının akma dayanımı %33'lük bir artışla 200 MPa değerine yükselmiştir.

175 °C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırılan Al-%5Cu alaşımının 150 MPa olan akma dayanımı, 18 saat yaşlandırma sonunda %38 oranında bir artış ile 207 MPa değerine çıkmıştır. AlSr10 ile aşıl原因an Al-Cu alaşımının 3 saat yaşlandırmada 178 MPa olan akma dayanımı, 18 saat yaşlandırma sonunda %40 oranında bir artış ile 250 MPa değerine artış göstermiştir. Al3Ti1B ile aşıl原因an Al-Cu alaşımının 3 saat yaşlandırmada 190 MPa olan akma dayanımı, 18 saat yaşlandırma sonucunda %39 oranında bir artışla 265 MPa değerine ulaşmıştır. Al5Ti1B ile aşıl原因an Al-Cu alaşımının 3 saat yaşlandırma sonunda 200 MPa olan akma dayanımı, 18 saat yaşlandırma sonunda %35 oranında bir artış göstererek 271 MPa değerine yükselmiştir.



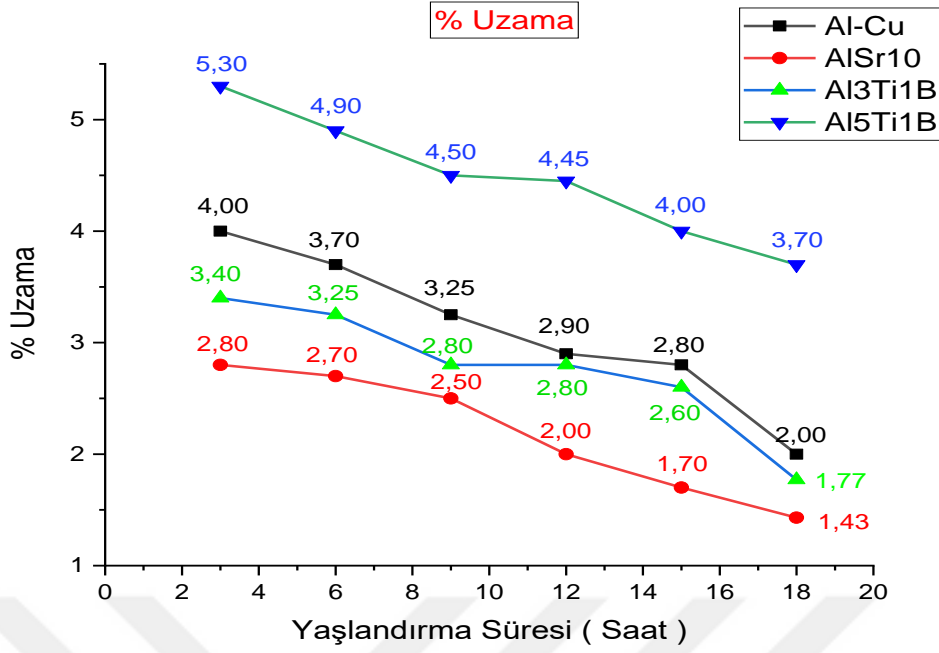
Sonuç olarak Al-%5Cu alaşımı için en yüksek akma dayanımı, Al5Ti1B tane inceltici ile aşılansarak, 175 °C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma sonunda 271 MPa olarak elde edilmiştir.

#### 8.6.4. % Uzama değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 8.40'ta 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine karşılık farklı tane inceltici master alaşımları girilen Al-%5Cu alaşımlarının % Uzama değerleri görülmektedir. Buna göre, 175°C'de 3 saat yaşlandırılan; AlSr10 ile aşılansan Al-Cu alaşımı, Al3Ti1B ile aşılansan Al-Cu alaşımı, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile Al5Ti1B ile aşılansan Al-Cu alaşımlarının %uzama değerleri azdan çoğa sırasıyla; %2,80, %3.40, %4.00 ve %5.30 değerlerinde elde edilmiştir.

Alüminyum alaşımlarında %5 uzama değerinin altındaki malzemeler gevrek malzeme olarak kabul edildiği için bu dört grup alaşımlar gevrek malzeme olarak değerlendirilir. Yaşlandırma süresinin artmasına paralel olarak yüzde uzama değerleri de azalma göstermiştir. 175°C'de 18 saat yaşlandırılan; AlSr10 ile aşılansan Al-Cu alaşımı, Al3Ti1B ile aşılansan Al-Cu alaşımı, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile Al5Ti1B ile aşılansan Al-Cu alaşımlarının %uzama değerleri azdan çoğa sırasıyla; %1.43, %1.77, %2.00 ve %3.70 değerlerinde elde edilmiştir.

AlSr10 ile aşılansan Al-Cu alaşımında en düşük %uzama değerleri elde edilmiştir. %uzama değeri en yüksek olan alaşım ise 175°C'de 3 saat yaşlandırılan Al5Ti1B ilave edilen Al-Cu alaşımı olmuştur. Alaşımların hepsinde yaşlandırma süresinin artmasıyla %uzama değerlerinde azalma görülmüştür.



**Şekil 8.40** 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C sıcaklıkta farklı yaşlandırma sürelerine karşılık; aşılavıcı girilmeyen Al-Cu ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşılaman Al-Cu alaşımlarının **Yüzde Uzama** değerleri.

### 8.6.5 V-Charpy çentik darbe testlerinin sonuçları

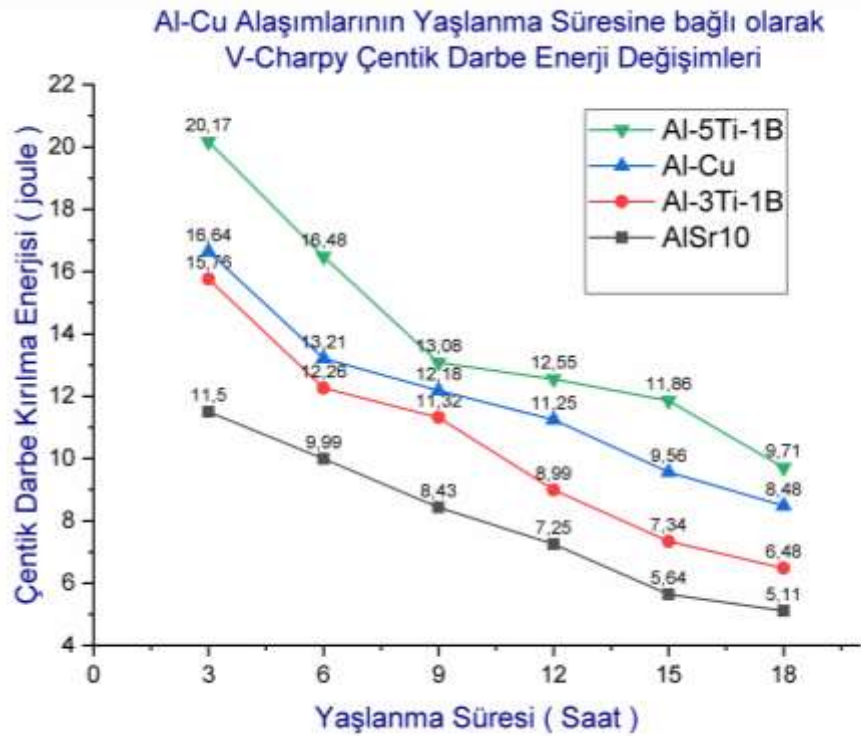
Şekil 8.41’de 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C’de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırılan; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B ile aşılaman Al-%5Cu alaşımlarının V-Charpy çentik darbe enerjileri görülmektedir. Buna göre AlSr10 tane inceltici girilen Al-Cu alaşımının çentik darbe enerjisi 3 saat yaşlandırma sonunda 11,50 joule iken, 18 saat yaşlandırma sonunda 5,11 joule değerine düşerek malzemenin sünekliği %44 oranında azalmıştır. Malzeme mukavemet kazanıp sertlik değeri yükseldikçe gevreklik kazanmakta dolayısıyla sünekliği azalmaktadır. Al3Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımının çentik darbe enerjisi 3 saat yaşlandırma sonunda 15,76 joule iken, 18 saat yaşlandırma sonunda 6,48 joule değerine düşerek %41 oranında sünekliği azalmıştır.

Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımının çentik darbe enerjisi 3 saat yaşlandırma sonunda 16,64 joule iken, 18 saat yaşlandırma sonunda 8,48 joule değerine düşerek %50 oranında sünekliği azalmıştır. Sünekliği en yüksek alaşım olan Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımının çentik darbe enerjisi 3 saat yaşlandırma sonunda

20,17 joule iken, 18 saat yaşlandırma sonunda 9,71 joule değerine düşerek %52 oranında sünekliği azalmıştır. Şekil 8.41'de Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımının süneklik değerlerinin diğer üç alaşıma oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Çizelge 8.12'de dört farklı alüminyum bakır alaşımlarının farklı yaşlandırma sürelerindeki V-Charpy çentik darbe enerjileri joule cinsinden verilmiştir.

**Çizelge 8.12.** 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırılan, tane inceltici girilmeyen ve AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B gibi üç farklı tane inceltici girilen Al-Cu alaşımlarının V-Charpy çentik darbe enerjileri.

Yaşlandırma Süresi (Saat)	V-Charpy Çentik Darbe Enerjisi (joule)					
	3	6	9	12	15	18
AlSr10 ilave edilen alaşım	11,50	9,99	8,43	7,25	5,64	5,11
Al-3Ti-1B ilave edilen alaşım	15,76	12,26	11,32	8,99	7,34	6,48
Al-%5Cu alaşımı	16,64	13,21	12,18	11,25	9,56	8,48
Al-5Ti-1B ilave edilen alaşım	20,17	16,48	13,08	12,55	11,86	9,71



**Şekil 8.41** 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 3 ,6 ,9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırılan; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B gibi üç farklı tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının V-Charpy çentik darbe enerjileri.

### 8.6.6. Aşınma Deneylelerinin Sonuçları

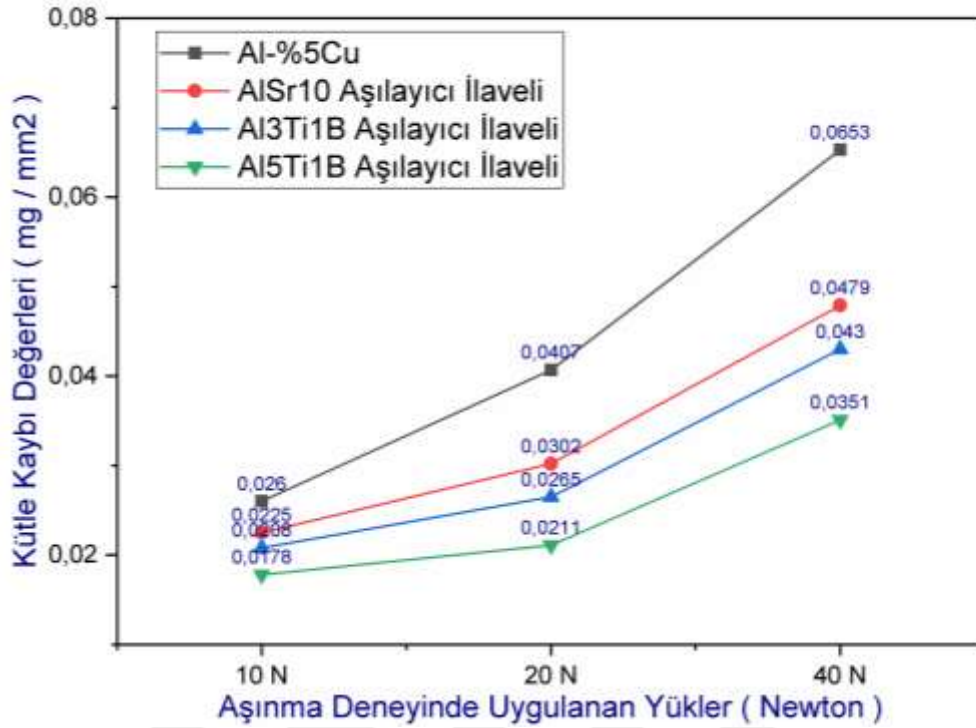
Şekil 8.42’de Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B gibi üç farklı tane inceltici girilerek, 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C’de 18 saat yaşlandırma uygulanan Al-Cu alaşımlarının aşınma deney sonuçları ve aşınma oranları kütle kaybı olarak görülmektedir. Bu deneyde kullanılan numunelerin hepsi; 25°C oda sıcaklığında, 1m/s sabit hızda ve 3000 m sabit kayma mesafesinde aşınma deneyine tabi tutulmuşlardır. Aşınma numunelerine 10 newton, 20 newton ve 40 newton olarak üç farklı yük uygulanmıştır. Şekil 8.42’deki grafiğe göre; aşılmalıcı girilmeyen Al-Cu alaşımlarının, 10 newton, 20 newton ve 40 newton yükleri altındaki aşınma oranları (kütle kaybı/numune yüzey alanı, mg/mm<sup>2</sup>) olarak sırasıyla; 0,0260 mg/mm<sup>2</sup>, 0,0407 mg/mm<sup>2</sup> ve 0,0653 mg/mm<sup>2</sup> değerlerinde elde edilmiştir. En fazla aşınma aşılmalıcı yapılmayan Al-%5Cu alaşımında görülmüştür.

AlSr10 tane inceltici girilen Al-Cu alaşımlarının, 10 newton, 20 newton ve 40 newton yükleri altındaki aşınma oranları (kütle kaybı/numune yüzey alanı, mg/mm<sup>2</sup>) olarak sırasıyla; 0,0225 mg/mm<sup>2</sup>, 0,0302 mg/mm<sup>2</sup> ve 0,0479 mg/mm<sup>2</sup> değerlerinde elde edilmiştir.

Al3Ti1B aşılmalıcı girilen Al-Cu alaşımlarının, 10 newton, 20 newton ve 40 newton yükleri altındaki aşınma oranları (kütle kaybı/numune yüzey alanı, mg/mm<sup>2</sup>) olarak sırasıyla; 0,0208 mg/mm<sup>2</sup>, 0,0265 mg/mm<sup>2</sup> ve 0,0430 mg/mm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

Al5Ti1B aşılmalıcı girilen Al-Cu alaşımlarının, 10 newton, 20 newton ve 40 newton yükleri altındaki aşınma oranları (kütle kaybı/numune yüzey alanı, mg/mm<sup>2</sup>) olarak sırasıyla; 0,0178 mg/mm<sup>2</sup>, 0,0211 mg/mm<sup>2</sup> ve 0,0351 mg/mm<sup>2</sup> değerlerinde bulunmuştur. Şekil 8.42’deki grafiğe göre; en fazla aşınma 40 newton yük uygulanan aşılmalıcı girilmeyen Al-Cu alaşımında 0,0653 mg/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Yük oranının artmasıyla aşınma miktarı da doğru orantılı olarak artma göstermektedir. En az aşınma ise 10 newton yük uygulanan Al5Ti1B aşılmalıcı girilen Al-Cu alaşımında 0,0178 mg/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

### Aşınan Numunelerin Birim Yüzey Alanlarındaki Kütle Kaybı Değerleri



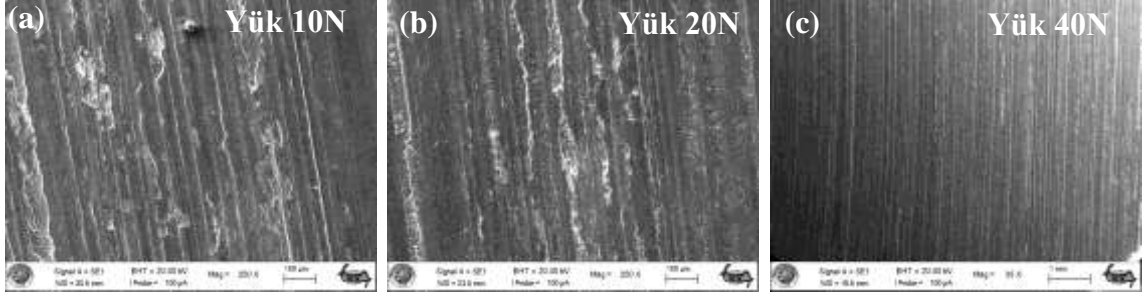
**Şekil 8.42** 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 18 saat yaşlandırılan, aşıl原因ıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşıl原因ıcıları girilen Al-Cu alaşımlarının mg/mm<sup>2</sup> cinsinden kütle kaybı Aşınma Oranları. (25°C'de oda sıcaklığında, sabit 1m/s hızda ve sabit 3000 m kayma mesafesinde)

#### 8.6.6.1 Al-Cu alaşımının aşınma deneyi SEM analiz sonuçları

Şekil 8.43'te aşıl原因ıcı girilmeyen, 175°C'de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşımının üç farklı yük altındaki aşınma deneyi sonucunda aşınan numune yüzeyinin SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma deneyleri 25°C oda sıcaklığında, 1m/s sabit hızda ve 3000 m sabit kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.44'te X5000 büyütmede aşınan numune yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. 10 newton, 20 newton ve 40 newton gibi üç farklı yük altında yapılan aşınma deneyinde en fazla aşınma 40 newton yük uygulanan numunede meydana gelmiştir. Aşıl原因ıcı girilmeyen, 175°C'de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşım numunelerinde 3000 m kayma mesafesindeki aşınma sonunda meydana gelen kütle kayıpları; 10 newton yükte 0,0260 mg, 20 newton yükte 0,0407 mg ve 40 newton yükte 0,0653 mg olarak elde edilmiştir.

Şekil 8.44'deki SEM görüntülerinde aşınma türlerinden abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınması çok belirgin bir şekilde görülmektedir. Abrasiv aşınma, çizilme veya yırtılma aşınması olarak ifade edilir. Birbiriyle eş çalışan malzeme çiftinde görülen abrasiv aşınma, hızlı ve büyük oranda aşınma meydana getiren oldukça önemli

bir aşınma çeşididir. Abrasiv aşınma türü, malzeme yüzeylerinin, bu yüzeylerden daha sert olan yabancı parçacıkların veya aynı malzemeden kopan parçacıkların, basınç altında etkileşmesi sonucunda sert parçacıkların malzeme yüzeylerinden kopması şeklinde tanımlanabilir (Varol, T., 2016). Şekil 8.43'te bu çalışmada yapılan aşınma deneyinde numune yüzeylerindeki çizikler ve abrasiv aşınma örnekleri görülmektedir.

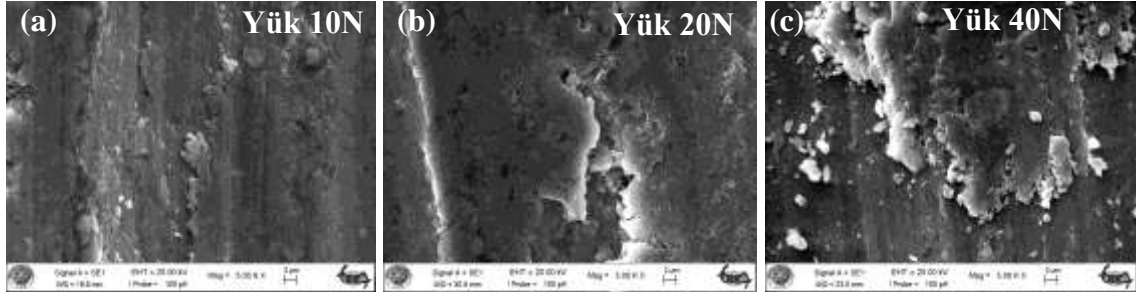


**Şekil 8.43** 175°C'de 18 saat yaşlandırılmış, aşılacağı girilmemiş Al-Cu alaşımın, 3000 m sabit kayma mesafesinde numune yüzeyinde meydana gelen çizikler ve abrasiv aşınma. (a) X250 büyütmede çizikler ve kopan parçalar (b) X250 büyütmedeki çizikler (c) X35 büyütmede çizikler ve abrasiv aşınma

Adhesiv aşınma, birbirleri üzerinde kayma sürtünmesi yapan yüzeylerde soğuk kaynak veya bölgesel bağlanmalar neticesinde bir yüzeyden diğerine malzeme aktarımı ve daha sonrasında kayma hareketi ile malzeme kaybı şeklinde meydana gelir. Birbiriyle temas halindeki yüzeylerde, yüzey pürüzlülükleri üzerine etki eden basıncın bölgesel plastik deformasyon yapacak kadar yüksek olması durumunda, küçük pürüz şeklindeki tepelere çok yüksek basınç etki eder. Bu noktalarda meydana gelen gerilme, bu pürüzlerin akma sınırını aşarsa; pürüzlerin birbirini çizmesi, plastik deformasyon ve sıvanıp kaynaklanma olayları baş gösterir. Kayma hareketi esnasında bu noktalar koparak bu bölgelerde yenme ve aşınmaya sebep olurlar. Bu tip malzeme kaybına adhesiv aşınma denir (Varol, T., 2016). Şekil 8.44'te adhesiv aşınma her üç numunede de görülmektedir. Fakat Şekil 8.44.b ve Şekil 8.44.c'de daha şiddetli bir adhesiv aşınma gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 8.44.c'de beyaz renkli adhesiv aşınmayla kopmuş parçalar yüzeye soğuk kaynak yapmış haldedir.

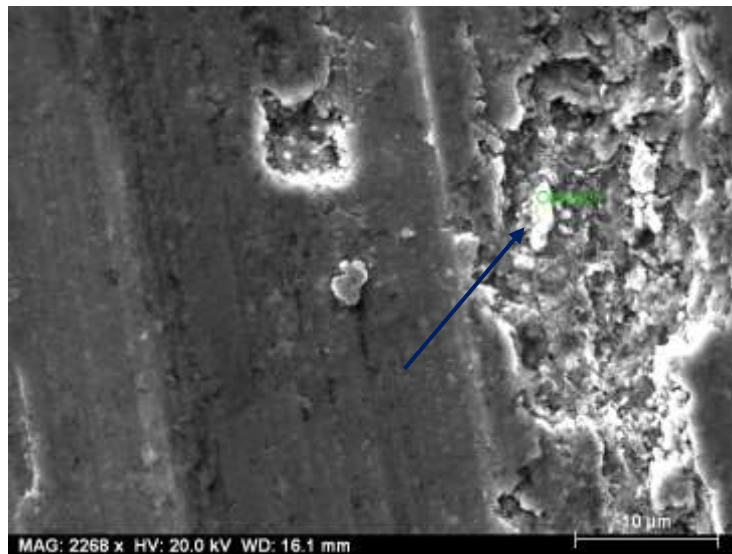
Yorulma (pitting) aşınması, daha çok dişli çarklar ve rulmanlı yataklar gibi birbirleriyle sürekli dinamik temas halinde olan yüzeylerde görülen bir aşınma türüdür. Bu tür yorulma aşınmasında temas alanları çok küçük olduğu için temas yüzeylerinde Hertz basınçları oluşmaktadır. Bu basınçların etkisiyle yüzeyin hemen altındaki bölgelerde kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu kayma gerilmelerinin maksimum olduğu noktalarda plastik deformasyon oluşmaktadır. Oluşan bu plastik

deformasyon, zamanla yüzeye doğru ilerleyerek, yüzeyde aşınma çukurcukları meydana gelmektedir (Kato, K. ve Adachi, K., 2001). Şekil 8.44.a-c'de yorulma aşınması sonucunda meydana gelen çukurcuklar ve yüzeyden ayrılmak üzere olan katmanlar görülmektedir.



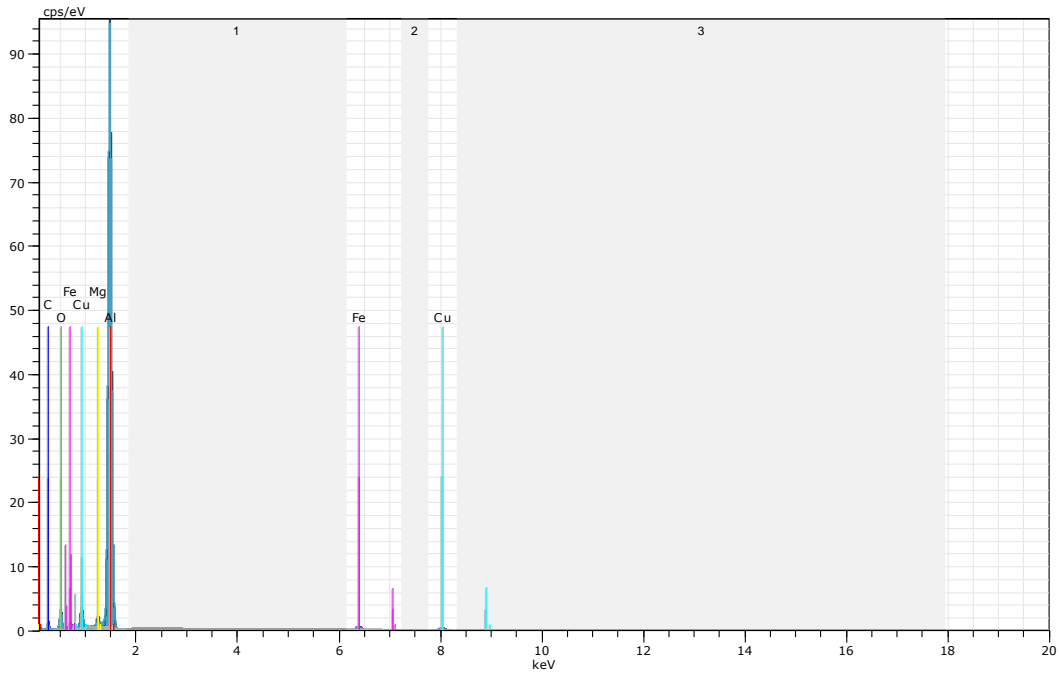
**Şekil 8.44** 175°C'de 18 saat yaşlandırılan, aşılıyıcısız Al-Cu alaşımının 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonraki X500 büyütmedeki SEM görüntüleri. Her üç şekilde de, abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınması mevcuttur. (a) 10 newton yük altında 0,0260 mg kütle kaybına uğramış (b) 20 newton yük altında 0,0407 mg kütle kaybına uğramış (c) 40 newton yük altında 0,0653 mg kütle kaybına uğramıştır. Yüzeyde aşınan ve kopan parçacıklar görülmektedir.

Şekil 8.45.a'da 175°C'de 18 saat yaşlandırılan aşılıyıcı girilmeyen Al-Cu alaşımının 10 newton yük altında 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonra X2268 büyütmedeki SEM nokta analizi görülmektedir. Abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınmasının beraber bulunduğu bu SEM görüntüsünde ok ile gösterilen beyaz renkli parçanın nokta analizi yapılmıştır. Şekil 8.45.b'de nokta analizi yapılan parçacığın EDX analiz grafiğinde mevcut elementlerin pikleri görülmektedir. Şekil 8.45.c'de EDX nokta analizi yapılan parçada bulunan, Al, Cu, Fe ve Mg elementlerinin, hacimce ve ağırlıkça yüzde oranları verilmiştir.



(a)





(b)

Spectrum: Objects

Element	Series	unn.C [wt.%]	norm.C [wt.%]	Atom.C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	K-series	81.10	71.18	62.61	3.9
Oksijen	K-series	17.25	15.14	22.46	3.0
Karbon	K-series	6.23	5.47	10.81	1.4
Bakır	K-series	3.99	3.50	1.31	0.2
Demir	K-series	3.69	3.24	1.38	0.2
Magnezyum	K-series	1.68	1.48	1.44	0.1
Total:		113.94	100.00	100.00	

(c)

**Şekil 8.45** 175°C'de 18 saat yaşlandırılan, aşılmalı girilmeyen Al-Cu alaşımının 10 newton yük altında 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonraki SEM nokta analizi görüntüsü. (a) SEM görüntüsündeki nokta analizi yapılan parçacık ok ile gösterilmiştir. (b) Nokta analizi yapılan parçacığın EDX analiz grafiğinde mevcut elementlerin pikleri (c) EDX nokta analizinde bulunan elementlerin hacimce ve ağırlıkça yüzde oranları.

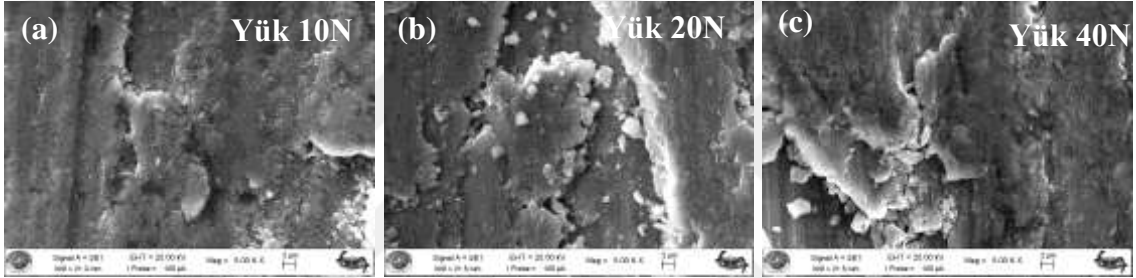
### 8.6.6.2 AlSr10 aşılmalı girilen Al-Cu alaşımının aşınma SEM analiz sonuçları

Şekil 8.46'da AlSr10 aşılmalı girilen, 175°C'de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşımının üç farklı yük altındaki aşınma deneylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma deneyleri 25°C oda sıcaklığında, 1m/s sabit hızda ve 3000 m sabit kayma



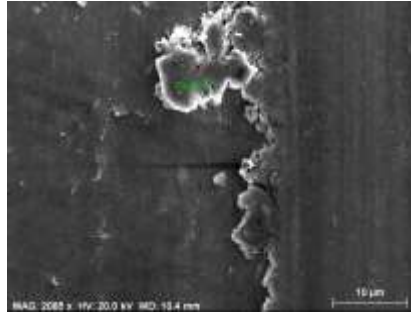
mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.46'da X5000 büyütmedeki aşınma numune yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. 10 N, 20 N ve 40 N gibi üç farklı yük altında yapılan aşınma deneyinde en fazla aşınma 40 N yük uygulanan numunede meydana gelmiştir. 10 N, 20 N ve 40 N yük uygulanan bu üç numunede 1m/s hızda, 3000 m kayma mesafesi sonunda meydana gelen kütle kayıpları sırasıyla 0,0225 mg, 0.0302 mg ve 0.0479 mg olarak elde edilmiştir.

Şekil 8.46'da X5000 büyütmedeki SEM görüntülerinde aşınma türlerinden; abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınması çok belirgin bir şekilde görülmektedir. Beyaz renkli kopan parçalar sürtünme basıncının etkisiyle yüzeye soğuk kaynak yapıyorlar sonra yüzeyden kütle kaybı olarak ayrılıyorlar.

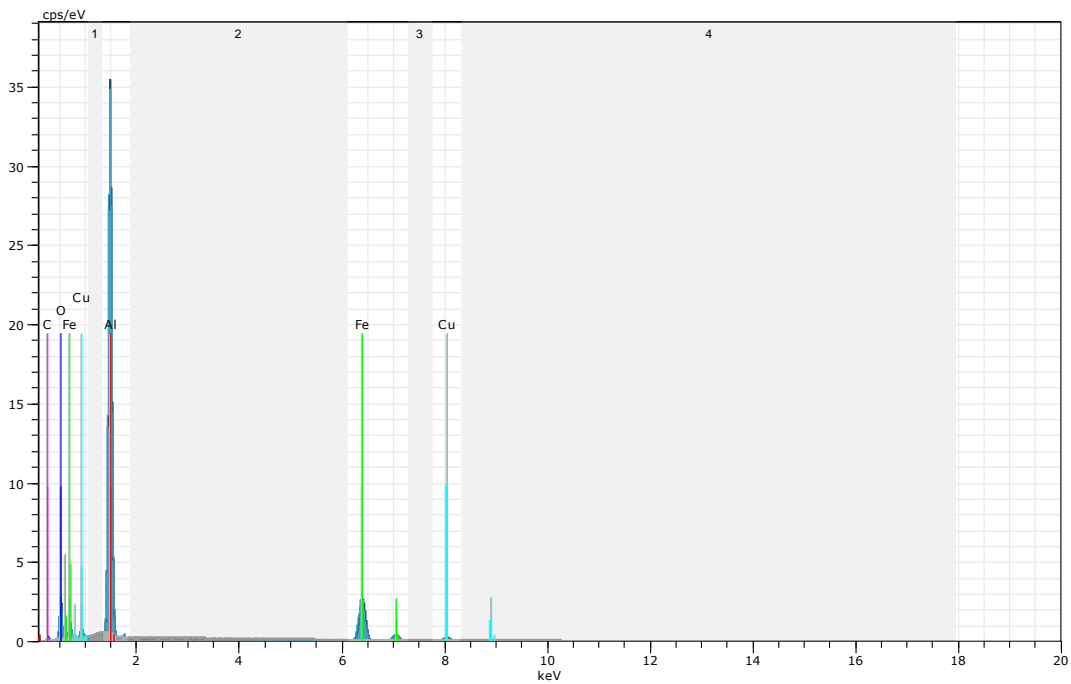


**Şekil 8.46** AlSr10 aşılacağı ilave edilen 175°C'de 18 saat yaşlandırılan, Al-Cu alaşımının, 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonra X5000 büyütmedeki SEM görüntüleri. (a) 10 N yük altında 0,0225 mg kütle kaybına uğramış (b) 20 N yük altında 0,0302 mg kütle kaybına uğramış (c) 40 N yük altında 0,0479 mg kütle kaybına uğramıştır. Yüzeyde aşınan ve kopan parçacıklar görülmektedir.

Şekil 8.47.a'da 175°C'de 18 saat yaşlandırılan, AlSr10 ile aşıl原因 Al-Cu alaşımının 40 N yük altında 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonra X2085 büyütmedeki SEM nokta analizi görülmektedir. Abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınmasının beraber bulunduğu bu SEM görüntüsündeki parçanın nokta analizi yapılmıştır. Şekil 8.47.b'de EDX nokta analizi yapılan parçacığın EDX analizinde mevcut elementlerin pikleri görülmektedir. Şekil 8.47.c'de EDX nokta analizi yapılan parçada bulunan, Al, Cu ve Fe elementlerinin, hacimce ve ağırlıkça yüzde oranları verilmiştir.



(a)



(b)

Spectrum: Objects

Element	Series	unn.C [wt.%]	norm.C [wt.%]	Atom.C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	K-series	35.12	42.26	40.78	1.7
Demir	K-series	22.25	26.77	12.48	0.8
Oksijen	K-series	20.05	24.13	39.27	4.4
Bakır	K-series	3.47	4.18	1.71	0.3
Karbon	K-series	2.21	2.66	5.76	1.0
Total:		83.10	100.00	100.00	

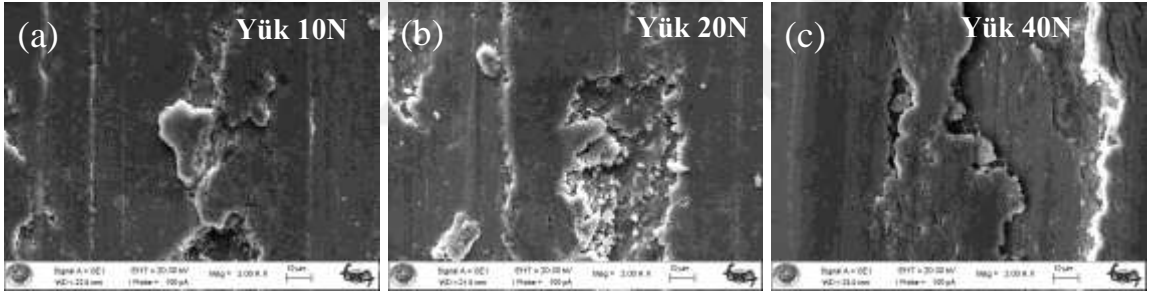
(c)

**Şekil 8.47** 175°C'de 18 saat yaşlandırılan AlSr10 aşıl原因ıcı ilave edilen Al-Cu alaşımının 40 N yük altında 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonraki SEM nokta analizi görüntüsü. (a) SEM görüntüsünde nokta analizi yapılan kopan parçacık görülmektedir. (b) Nokta analizi yapılan parçacığın EDX analizi grafiğinde alaşımda bulunan elementlerin pikleri görülmektedir. (c) Nokta analizinde parçacıkta bulunan elementlerin hacimce ve ağırlıkça yüzde oranları.

### 8.6.6.3 Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B girilen Al-Cu alaşımının aşınma SEM analizi sonuçları

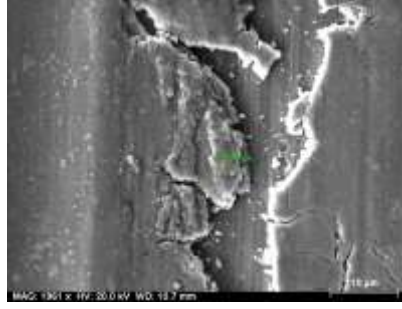
Şekil 8.48'de Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılayıcı girilen, 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşımının üç farklı yük altındaki aşınma deneylerinin X2000 büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma deneyleri 25<sup>0</sup>C oda sıcaklığında, 1m/s sabit hızda ve 3000 m sabit kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. 10 N, 20 N ve 40 N gibi üç farklı yük altında yapılan aşınma deneyinde en fazla aşınma 40 N yük uygulanan numunede meydana gelmiştir. 10 N, 20 N ve 40 N yük uygulanan bu üç numunede 1m/s hızda, 3000 m kayma mesafesi sonunda meydana gelen kütle kayıpları sırasıyla 0.0208 mg, 0.0265 mg ve 0.0430 mg olarak elde edilmiştir.

Şekil 8.48.a-c'de X2000 büyütmedeki SEM görüntülerinde aşınma türlerinden; abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınması çok belirgin bir şekilde görölmektedir. Beyaz renkli kopan parçalar sürtünme basıncının etkisiyle yüzeye soğuk kaynak yapıp sonra yüzeyden kütle kaybı olarak ayrılıyorlar. Eğer aşınma deneyi devam ettirilecek olursa kütle kaybının daha çok olacağı görölmektedir.

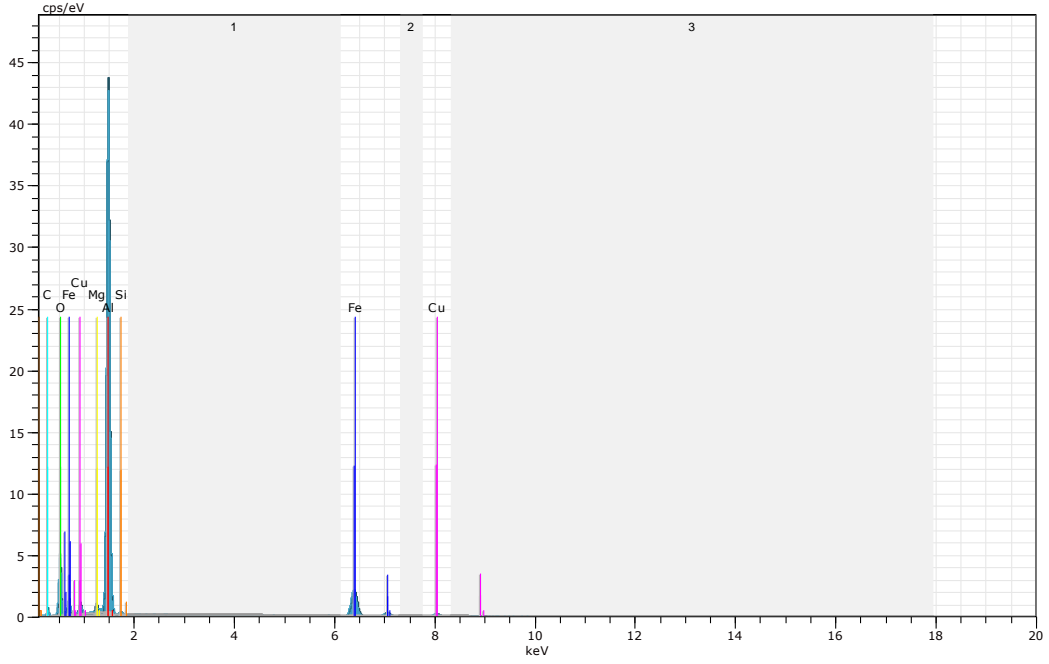


**Şekil 8.48** Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılayıcı ilave edilen 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılan, Al-Cu alaşımının, 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonra X2000 büyütmedeki SEM görüntüleri. (a) 10 N yük altında 0,0208 mg kütle kaybına uğramış. (b) 20 N yük altında 0,0265 mg kütle kaybına uğramış. (c) 40 N yük altında 0,0430 mg kütle kaybına uğramıştır. Yüzeyde aşınan ve kopan parçacıklar görölmektedir.

Şekil 8.49.a'da 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılan, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılanan Al-Cu alaşımının 40 N yük altında 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonra X1961 büyütmedeki SEM nokta analizi görölmektedir. Abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınmasının beraber bulunduğu bu SEM görüntüsündeki parçanın nokta analizi yapılmıştır. Şekil 8.49.a'da yorulma aşınmasıyla yüzeyden ayrılan ve ayrılacak olan tabakalar görölmektedir. Şekil 8.49.b'de nokta analizi yapılan parçacığın EDX analizinde mevcut elementlerin pikleri görölmektedir. Şekil 8.49.c'de EDX nokta analizi yapılan parçada bulunan, Al, Cu, Fe, Si ve Mg elementlerinin, ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir.



(a)



(b)

Spectrum: Objects

Element	Series	unn.C [wt.%]	norm.C [wt.%]	Atom.C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	K-series	63.02	53.22	47.11	3.0
Oksijen	K-series	29.81	25.17	37.58	4.2
Demir	K-series	16.44	13.88	5.94	0.5
Karbon	K-series	4.06	3.43	6.83	0.8
Bakır	K-series	3.15	2.66	1.00	0.2
Magnezyum	K-series	1.34	1.13	1.11	0.1
Silisyum	K-series	0.60	0.51	0.43	0.1
Total:		118.42	100.00	100.00	

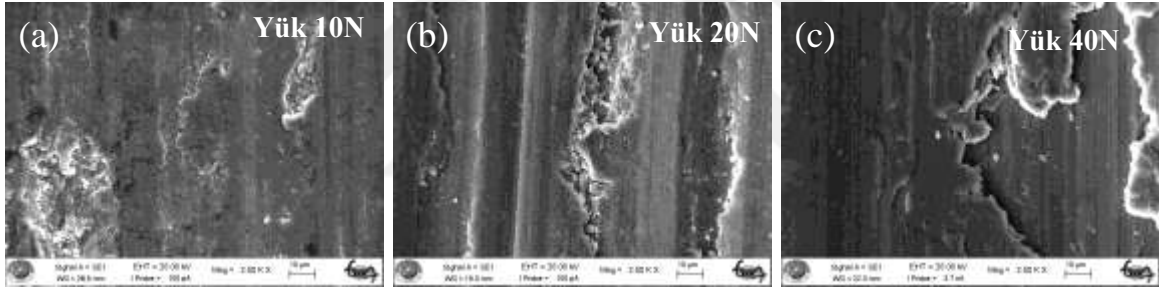
(c)

**Şekil 8.49** Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılama ilave edilen 175°C'de 18 saat yaşlandırılan Al-Cu alaşımının 40 N yük altında 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonraki SEM nokta analizi görüntüsü. (a) Nokta analizi yapılan parçacığın SEM görüntüsü. (b) Nokta analizi yapılan parçacığın EDX analizinde alaşımda bulunan elementlerin pikleri görülmektedir. (c) EDX nokta analizinde parçacıkta bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

#### 8.6.6.4 Al5Ti1B girilen Al-Cu alaşımının aşınma SEM analiz sonuçları

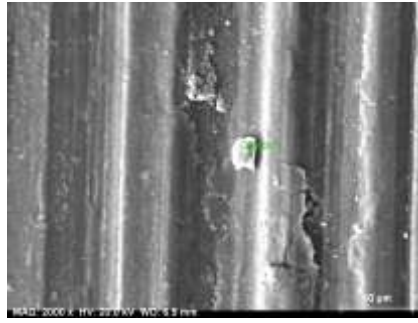
Şekil 8.50'de Al5Ti1B aşılayıcısı girilen, 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılmış Al-Cu alaşımının üç farklı yük altındaki aşınma deneylerinin X2000 büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma deneyleri 25<sup>0</sup>C oda sıcaklığında, 1m/s sabit hızda ve 3000 m sabit kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. 10 N, 20 N ve 40 N gibi üç farklı yük altında yapılan aşınma deneyinde en fazla aşınma 40 N yük uygulanan numunede meydana gelmiştir. 10 N, 20 N ve 40 N yük uygulanan bu üç numunede, 3000 m kayma mesafesi sonunda meydana gelen kütle kayıpları sırasıyla, 0,0178 mg, 0,0211 mg ve 0,0351 mg olarak elde edilmiştir.

Şekil 8.50.a-c'de X2000 büyütmedeki SEM görüntülerinde, abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınması birlikte gerçekleştiği görölmektedir. Yorulma aşınması ile meydana gelen numune yüzeyindeki tabakalar Şekil 8.50.c'de belirgin olarak görölmektedir.

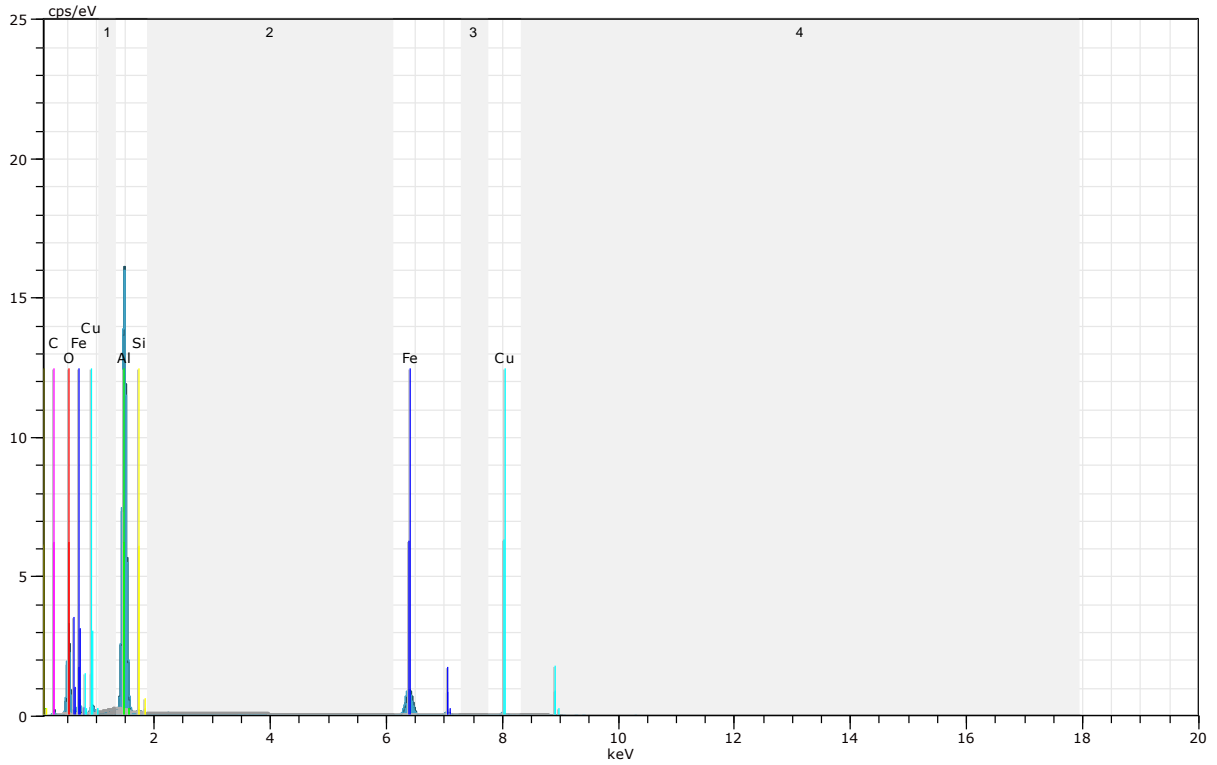


**Şekil 8.50** Al5Ti1B aşılayıcı ilave edilen 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılan, Al-Cu alaşımının, 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonra X2000 büyütmedeki SEM görüntüleri. (a) 10 N yük altında 0,0178 mg kütle kaybına uğramış (b) 20 N yük altında 0,0211 mg kütle kaybına uğramış (c) 40 N yük altında 0,0351 mg kütle kaybına uğramıştır. Yüzeyde, abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınmasının birlikte oluşturdukları, aşınma yüzeyi ve kopan parçacıkların oluşturdukları kazıntı ve boşluklar görölmektedir.

Şekil 8.51.a'da 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılan, Al5Ti1B ile aşılanan Al-Cu alaşımının 20 N yük altında 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonra X2000 büyütmedeki SEM nokta analizi görölmektedir. Abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınmasının beraber bulunduğu SEM görüntüsündeki parçanın nokta analizi yapılmıştır. Şekil 8.51.a'da yorulma aşınmasıyla yüzeyden ayrılan beyaz renkli parçacık görölmektedir. Şekil 8.51.b'de nokta analizi yapılan parçacığın EDX analizinde mevcut elementlerin pikleri görölmektedir. Şekil 8.51.c'de EDX nokta analizi yapılan parçada bulunan, Al, Cu, Fe, ve Si elementlerinin, ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir.



(a)



(b)

Spectrum: Noktasal cisim

Element	Series	unn.C [wt.%]	norm.C [wt.%]	Atom.C [at.%]	Error [%]
Oksijen	K-series	35.14	39.88	56.66	5.1
Alüminyum	K-series	31.62	35.89	30.23	1.5
Demir	K-series	16.84	19.11	7.78	0.5
Bakır	K-series	2.33	2.65	0.95	0.1
Karbon	K-series	1.93	2.20	4.15	0.6
Silisyum	K-series	0.25	0.28	0.23	0.0
Toplam:		88.11	100.00	100.00	

(c)

**Şekil 8.51** Al5Ti1B aşılama ilave edilen 175°C'de 18 saat yaşlandırılan Al-Cu alaşımının 20 N yük altında 3000 m kayma mesafesinde aşındırıldıktan sonraki SEM nokta analizi görüntüsü. (a) Nokta analizi yapılan kopan parçacığın SEM görüntüsü. (b) Nokta analizi yapılan parçacığın EDX analizinde alaşımda bulunan elementlerin pikleri görülmektedir. (c) EDX nokta analizinde parçacıkta bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

## 8.7 Daldırmalı Korozyon Deneylerinin Sonuçları

Daldırmalı korozyon deneyi için dört farklı alaşım seçilmiştir. Bunlar; AlSr10 ile aşıl原因an Al-Cu alaşımı, aşıl原因ıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı, Al3Ti1B ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımı ve Al5Ti1B ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımıdır. Bu dört grup alaşım numunelerine 535<sup>0</sup>C'de 4 saat çözeltiye alma, 25<sup>0</sup>C'de suda su verme, 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırma uygulanmıştır. Daldırmalı Korozyon deneyi için; 300 g distile su, %3,5 NaCl ve %1 HCl (%37'lik konsantrasyon) asidik çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti içerisindeki numuneler 25<sup>0</sup>C sıcaklıkta 590 saat bekletilerek daldırmalı korozyon deneyi uygulanmıştır.

Şekil 8.52'de 25<sup>0</sup>C sıcaklıkta 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz kalan Al-Cu alaşımlarının yüzey alanlarında korozyondan sonra meydana gelen kütle kayıpları mg/mm<sup>2</sup> cinsinden verilmiştir. Bu grafiğe göre; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşıl原因anan dört grup Al-Cu alaşımlarının, 590 saat daldırmalı korozyona tabi tutulduktan sonra numunelerde meydana gelen kütle kayıpları görülmektedir. AlSr10 ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımı, aşıl原因ıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı, Al3Ti1B ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımı ve Al5Ti1B ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımlarının 25<sup>0</sup>C sıcaklıkta 590 saat daldırmalı korozyona maruz kalan bu alaşımlardaki; (kütle kaybı/numune yüzey alanları) sırasıyla; 0,5437 mg/mm<sup>2</sup>, 0,5808 mg/mm<sup>2</sup>, 0,6832 mg/mm<sup>2</sup> ve 0,7395 mg/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

Şekil 8.52.a'da daldırmalı korozyon deneyinde 300 saat korozyon süresinde çok az oranda korozyondan etkilenme görülürken, 300 saatten sonra pik yaparak korozyondan etkilenme oranı her dört alaşım için de çok artma göstermiştir.

Daldırmalı korozyondan en az etkilenen alaşım, AlSr10 aşıl原因ıcı girilen Al-Cu alaşımı olmuştur. Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı, AlSr10 ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımından daha çok korozyona uğramıştır. Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşıl原因anan alaşımların, AlSr10 ile aşıl原因anan ve aşıl原因ama yapılmayan Al-Cu alaşımlarından daha fazla daldırmalı korozyona uğradıkları görülmüştür.

Çizelge 8.13'te 25<sup>0</sup>C'de 590 saat daldırmalı korozyona maruz bırakılan dört farklı Al-Cu alaşımlarının belirtilen saat süresinde, numune yüzeyindeki kütle kayıplarının; mg/mm<sup>2</sup> cinsinden tartım değerleri görülmektedir.

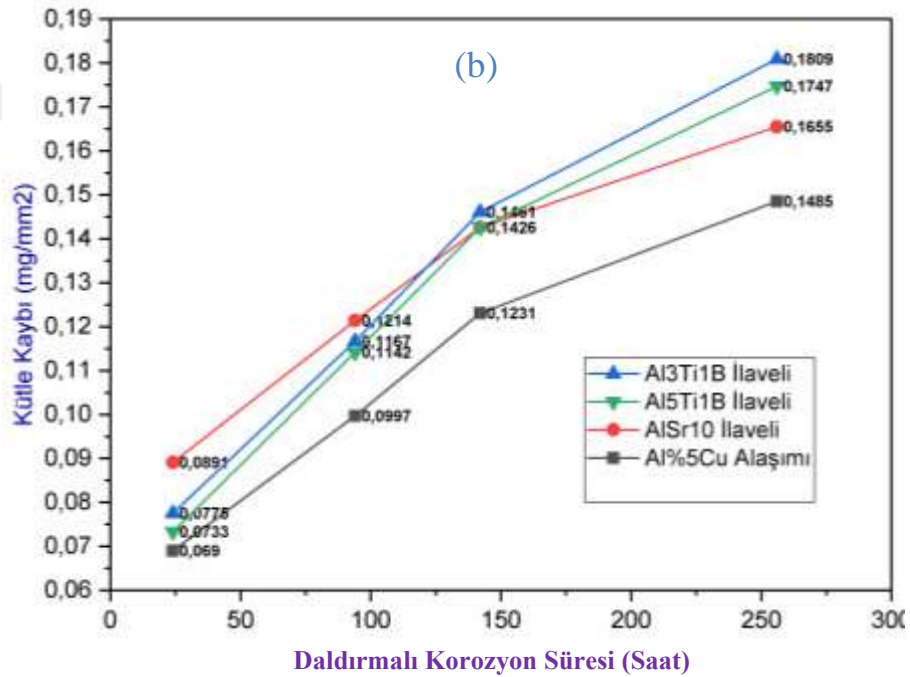
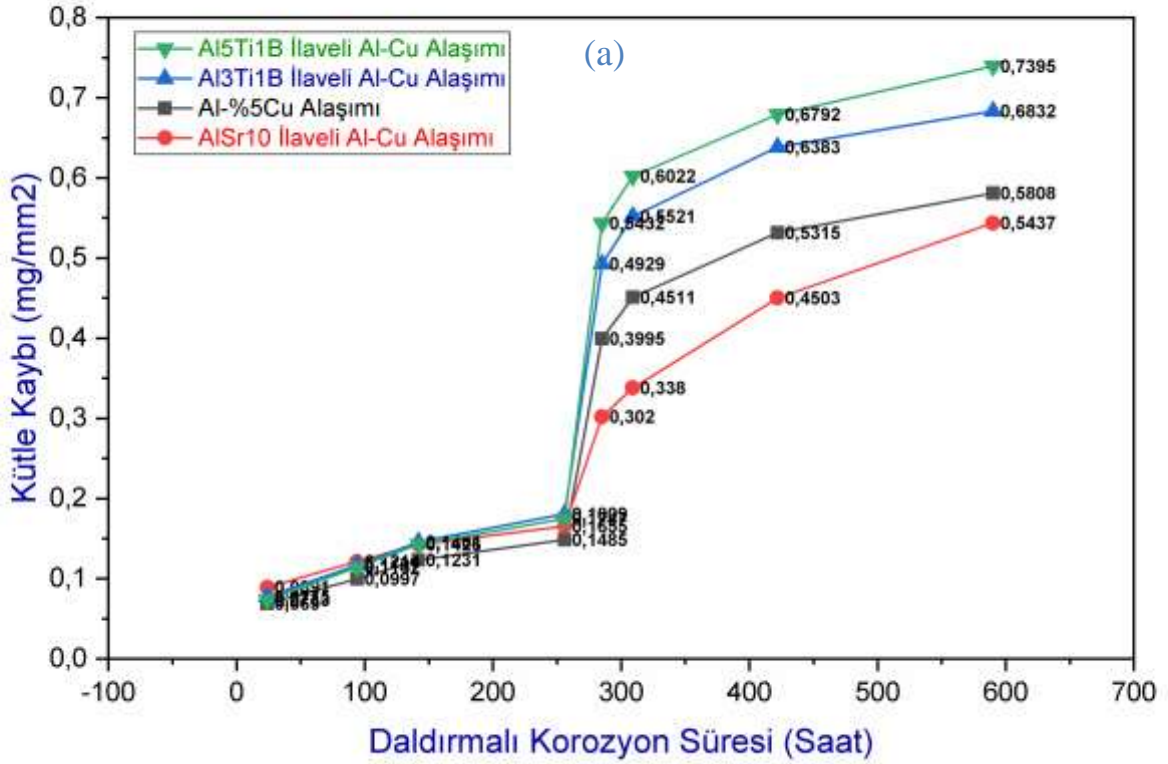
**Çizelge 8.13.** 25°C'de 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan dört farklı Al-Cu alaşımlarının belirtilen sürelerde numune yüzeylerindeki kütle kayıplarının, birim yüzey alanlarına bölünmüş haldeki değerleri (miligram/mm<sup>2</sup>) cinsinden tartım değerleri

Ölçülen tartım değerleri [ mg/mm<sup>2</sup> ] cinsindedir

Korozyon deneyi süresi	Al-Cu Alaşımı	AlSr10 İlaveli Al-Cu Alaşımı	Al3Ti1B İlaveli Al-Cu Alaşımı	Al5Ti1B İlaveli Al-Cu Alaşımı
24 saat	0,0690	0,0891	0,0775	0,0733
94 saat	0,0997	0,1214	0,1167	0,1142
142 saat	0,1231	0,1426	0,1461	0,1426
256 saat	0,1485	0,1655	0,1809	0,1747
285 saat	0,3995	0,3020	0,4929	0,5432
309 saat	0,4511	0,3380	0,5521	0,6022
422 saat	0,5315	0,4503	0,6383	0,6792
590 saat	0,5808	0,5437	0,6832	0,7395



## Daldırmalı Korozyon Uygulanan Numunelerde Birim Yüzey Alandaki Kütle Kaybı Değerleri



**Şekil 8.52.** Aşılacağı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşıl原因 Al-Cu alaşımının 25°C sıcaklıkta 590 saat daldırmalı korozyon uygulandıktan sonra numunelerin yüzey alanlarında meydana gelen kütle kayıpları. (a) Numune yüzeylerinde meydana gelen kütle kayıpları mg/mm<sup>2</sup> cinsinden verilmiştir. (b) Daldırmalı Korozyonun grafiğinin 300 saatlik daldırmalı korozyon bölgesi.

### 8.7.1 Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuçları

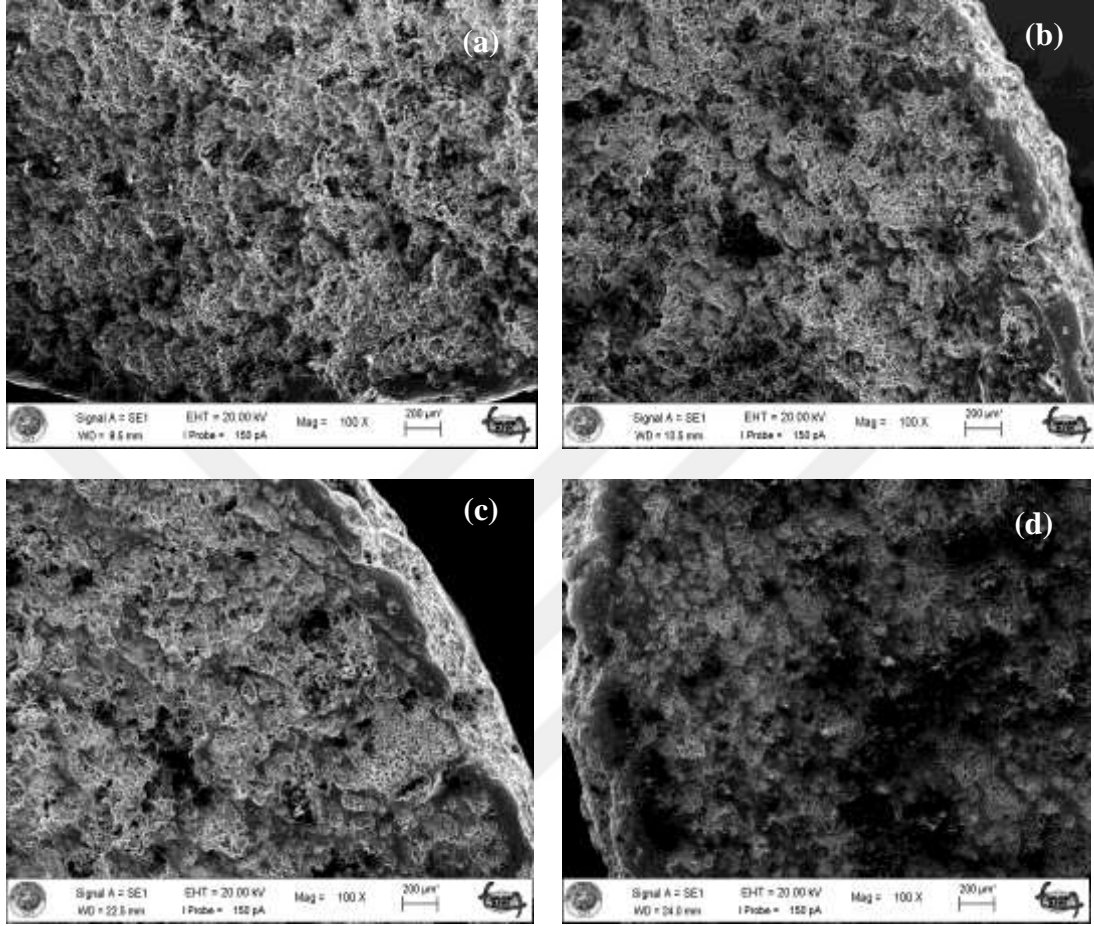
Şekil 8.53'te 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan, 590 saat daldırmalı korozyon uygulanmış dört farklı Al-Cu alaşımlarının X100 büyütmedeki SEM yüzey görüntüleri görülmektedir. X100 büyütmede tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılama girilen Al-Cu alaşımları daldırmalı korozyondan etkilenmiştir. Numunelerin yüzeylerinde korozyon sebebiyle kütle kayıpları meydana gelmiştir. Korozyon süresinin artmasıyla doğru orantılı olarak kütle kayıpları artmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının, safiyet derecesi azaldıkça korozyona karşı mukavemet değerleri düşer. Alüminyum alaşımlarına katılan alaşım elementleri korozyon direncini azaltmaktadır (Chong ve arkadaşları, 2003; ODTÜ, 2011). Alüminyum alaşımlarının kristal yapısı ne kadar saf ise korozyon dayanımı o kadar iyi olur. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırılması sonucunda oluşan intermetalik fazlar, alaşımın korozyon direncini azaltmaktadır. Malzemenin kristal yapısında bulunan fazlar birbirlerine sıkı bir şekilde, bağ enerjisi ile bağlı değilse daha kolay çözünebilirler ve böylece korozyon meydana gelir. (Craig ve Anderson, 1995).

Korozyonun gerçekleşmesi için şu dört unsurun mutlaka bulunması gerekir. Bunlar; anot, katot, elektrolit ve metalik iletim yoludur. Metal, anotta oksitlenir ve metal iyonları elektrolite geçer. Katotta oksijen indirgenir. Metal iyonlarının oksidasyonu ile oluşan elektronlar iletken metal sayesinde katoda transfer olur. Böylece indirgenme reaksiyonu gerçekleşir ve galvanik korozyon meydana gelir.

Çukurcuk korozyonu bölgesel bir korozyon türüdür ve genellikle alüminyum gibi yüzeyinde koruyucu bir tabakaya sahip malzemelerde görülür. Ortamda bulunan iyonlar veya yüzeydeki tabakada meydana gelen herhangi bir hasar, bu bölgenin daha anodik olmasına ve çevresiyle galvanik ikili oluşturmasına sebep olur. Neticede korozyon malzemenin iç kısımlarına doğru ilerler. Çukurcuk korozyonunu asidik ortamlardaki saldırgan iyonlar tetikler. Böylece yüzey tabakasının kararlı olduğu potansiyel değerlerinde korozyon meydana gelir. Aynı şekilde aktif-pasif geçiş bölgelerinde oksit tabakası zarar görürse bölgesel çukur korozyonu meydana gelebilir. Alüminyum ve alaşımlarında en çok rastlanan korozyon tipi çukur korozyonudur ve son derece tehlikeli sonuçlara neden olabilmektedir (Kara, F., 2019).

Bu çalışmada korozyonun meydana geldiği ortam, tuzlu su ve asidik (300 g distile su, %3,5 NaCl ve % 1 HCl) ortamdır. Şekil 8.53.(a-c)'de görülen resimlerde meydana gelen korozyon galvanik korozyon ve çukurcuk korozyonudur.



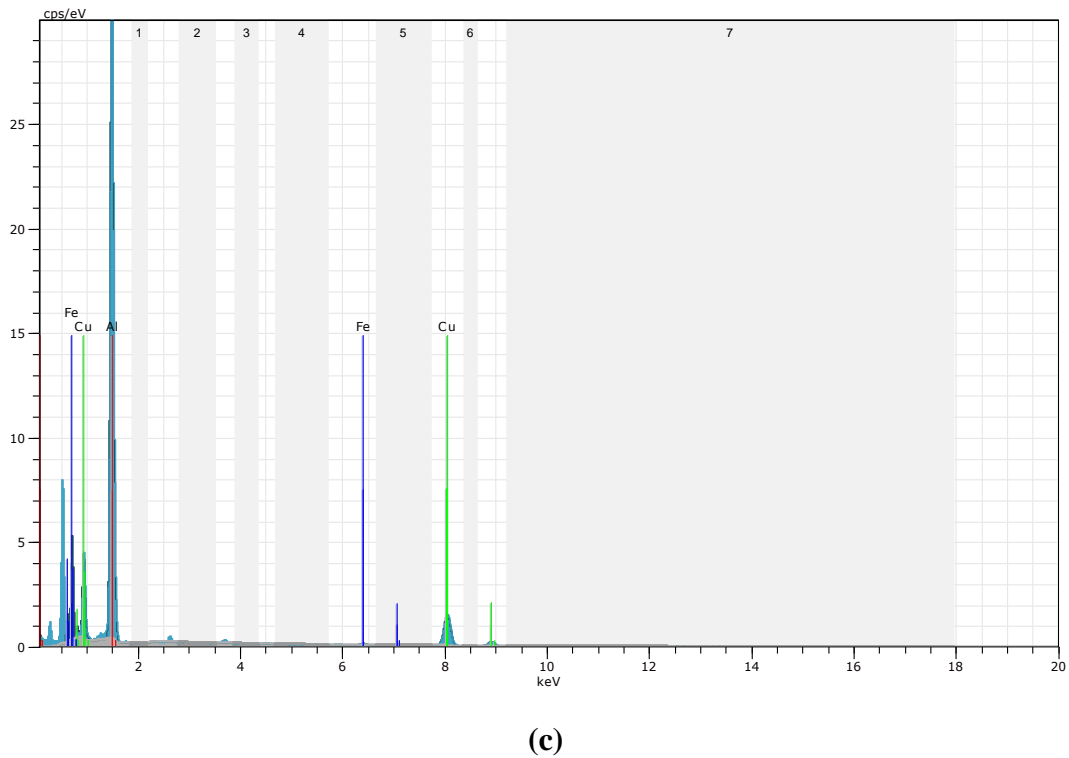
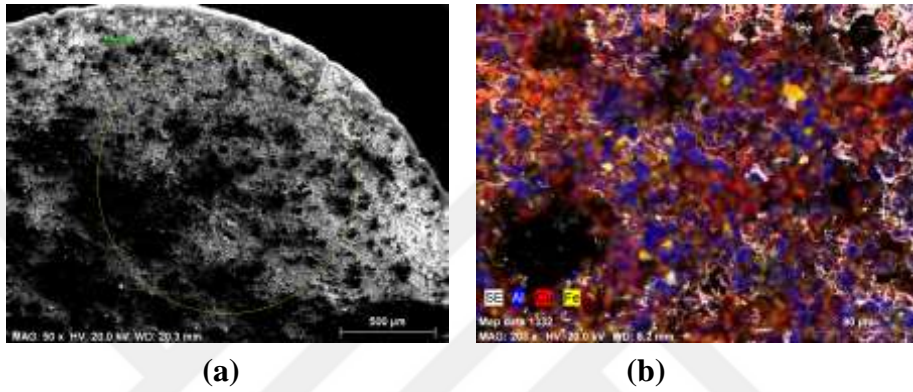
**Şekil 8.53** 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan, 25<sup>0</sup>C'de 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan dört farklı Al-Cu alaşımlarının X100 büyütmedeki SEM yüzey görüntüleri. (a) Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı (b) AlSr10 aşılایıcı girilen Al-Cu alaşımı (c) Al3Ti1B aşılایıcı girilen Al-Cu alaşımı (d) Al5Ti1B aşılایıcı girilen Al-Cu alaşımı

### 8.7.1.1 Aşılایıcı girilmeyen Al-Cu alaşımının Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuçları

Şekil 8.54'te, 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan ve 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan aşılایıcı girilmeyen Al-Cu alaşımının SEM ve EDX görüntüleri ile numunenin seçilen bölgesinde alaşımın yapısında bulunan elementlerin yüzde oranları görülmektedir.

Şekil 8.54.a'da X50 büyütmede korozyona uğramış numune yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 8.54.b'de seçilen bölgede X203 büyütmede Al, Cu ve

Fe elementlerine renk ataması yapılmış Al-Cu alaşımının renkli alan haritalama yöntemi ile alınan SEM görüntüsü görülmektedir. Mavi renkli bölgeler  $\alpha$ -Al matristir. Kırmızı ile renklendirilen noktalar  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiğinin olduğu bölgelerdir. Şekil 8.54.c'de EDX grafiğinde Al, Cu ve Fe elementlerinin pikleri görülmektedir. Şekil 8.54.d'de seçilen bölgedeki Al, Cu ve Fe elementlerinin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Buna göre; Al ve bakır elementinin ağırlıkça yüzde oranları, %73,6 Al ve %26,06 Cu'dur. Atomik yüzde oranları, %86,41 Al ve %13,09 Cu'dur. Şekil 8.54.a ve b'deki resimlerde galvanik korozyon ve çukurcuk korozyonu görülmektedir.



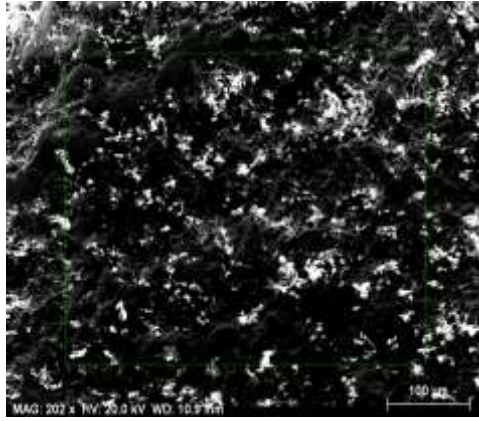
Element	unn.C [wt. %]	norm.C [wt. %]	Atom.C [at. %]
Alüminyum	50,26	73,06	86,41
Bakır	17,93	26,06	13,09
Demir	0,61	0,88	0,50
Toplam:	68,79	100,00	100,00

(d)

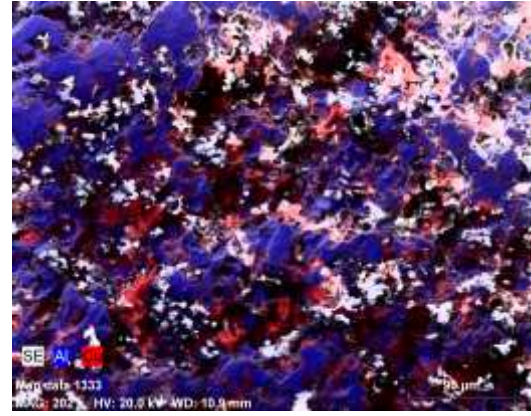
**Şekil 8.54** 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan ve 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan aşılama girilmeyen Al-Cu alaşımı. (a) Galvanik korozyon ve çukur korozyonuna maruz kalmış numunenin; X50 büyütmede 500 µm ölçekli SEM görüntüsü. (b) Galvanik korozyon ve çukur korozyonuna maruz kalmış numunenin; X203 büyütmede Al, Cu ve Fe elementleri için renk ataması yapılmış numunenin alan haritalama SEM görüntüsü. (c) Al, Cu ve Fe elementlerinin EDX grafiği. (d) Al-Cu alaşım numunenin seçilen bölgesinde bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

### 8.7.1.2 AlSr10 ile Aşılama Al-Cu Alaşımının Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuçları

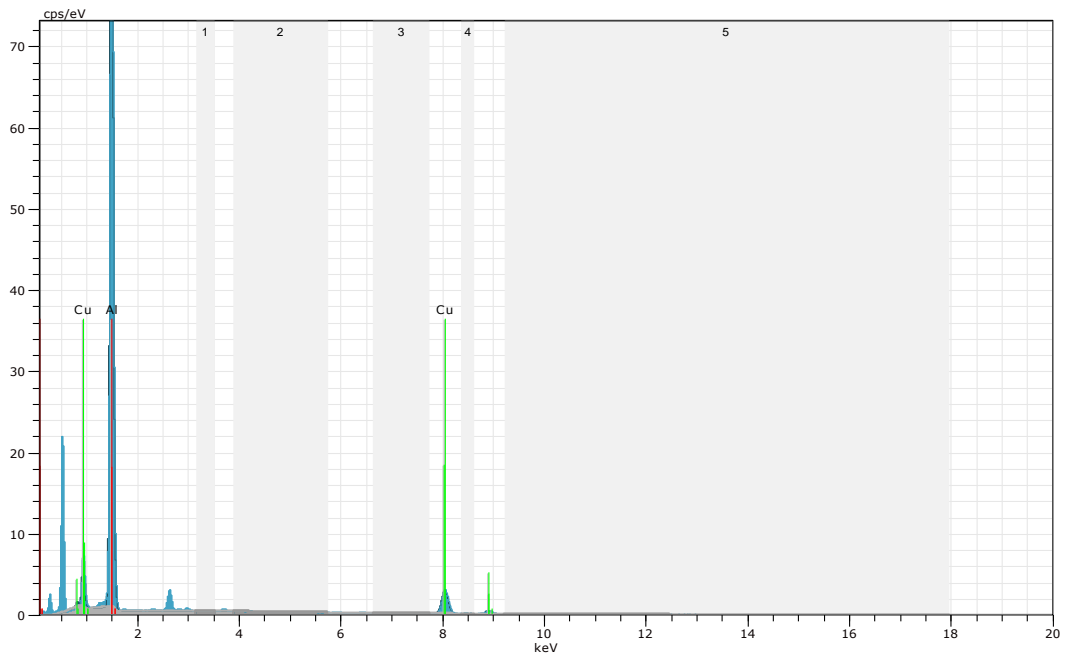
Şekil 8.55'te, 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan ve 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan AlSr10 aşılama girilen Al-Cu alaşımının SEM ve EDX görüntüleri ile numunenin seçilen bölgesinde alaşımın yapısında bulunan elementlerin yüzde oranları görülmektedir. Şekil 8.55.a'da X202 büyütmede daldırmalı korozyona uğramış numune yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 8.55.b'de seçilen bölgede X202 büyütmede Al ve Cu elementlerine renk ataması yapılmış olan Al-Cu alaşımının renkli alan haritalama SEM görüntüsü görülmektedir. Mavi renkli bölgeler  $\alpha$ -Al matristir. Kırmızı ile renklendirilen noktalar  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiğinin olduğu bölgelerdir. Şekil 8.55.c'de EDX grafiğinde Al ve Cu elementlerinin pikleri görülmektedir. Şekil 8.55.d'de seçilen bölgedeki Al ve Cu elementlerinin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Buna göre; Al ve bakır elementinin ağırlıkça yüzde oranları, %81,89 Al, %18,11 Cu ve atomik yüzde oranları, %91,42 Al, %8,58 Cu elementinden müteşekkildir.



(a)



(b)



(c)

Element	Seri	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	K-serisi	57.58	81.89	91.42	2.8
Bakır	K-serisi	12.73	18.11	8.58	0.4
Toplam:		70.31	100.00	100.00	

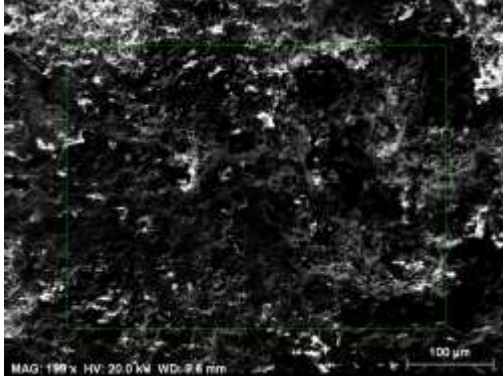
(d)

**Şekil 8.55** 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan, 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan AlSr10 aşılama ilave edilen Al-Cu alaşımı. (a) X202 büyütmede numunenin siyah beyaz SEM görüntüsü. (b) X202 büyütmede Al ve Cu elementleri için renk ataması yapılmış numunenin alan haritalama SEM görüntüsü. (c) Al ve Cu elementlerinin EDX grafiği. (d) AlSr10 aşılama ilave edilen Al-Cu alaşımının seçilen bölgesinde bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

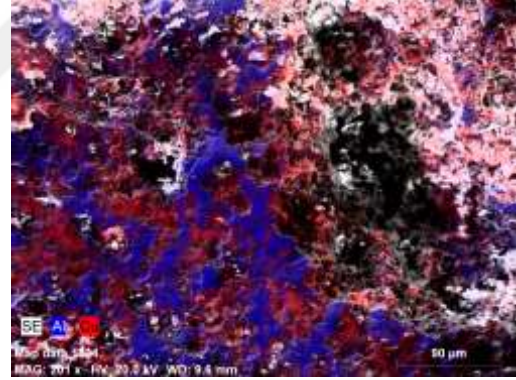


### 8.7.1.3 Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ile Aşıl原因an Al-Cu Alaşımının Daldırmalı Korozyon SEM İnceleme Sonuçları

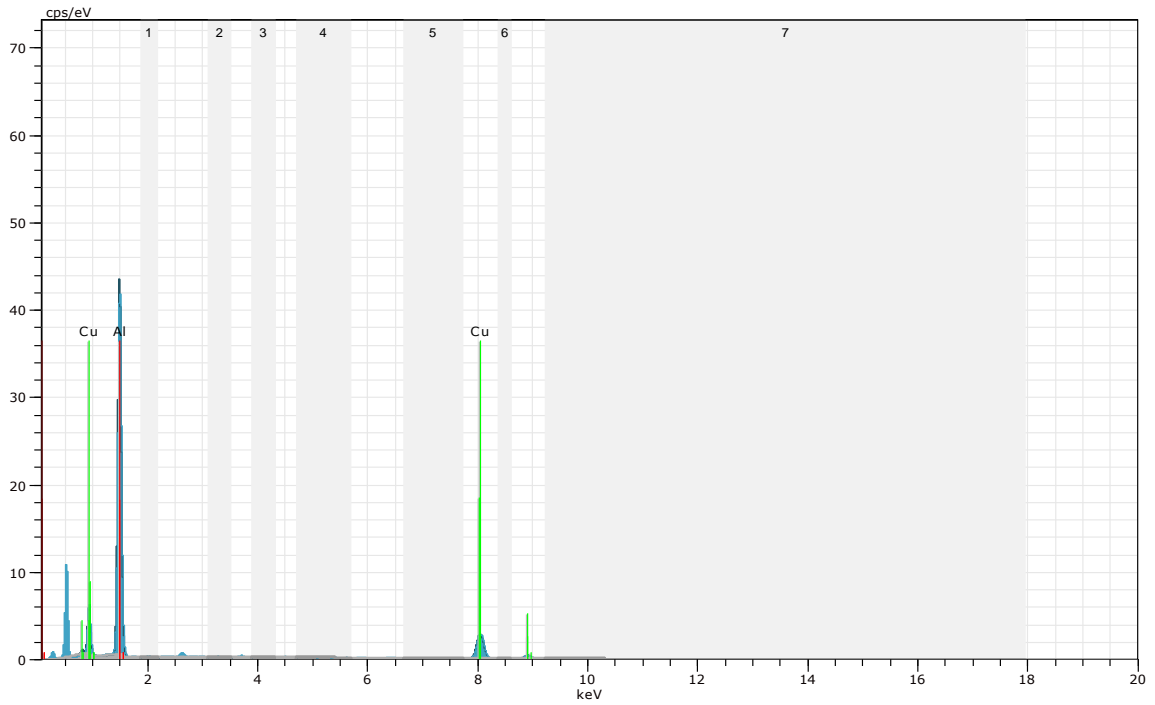
Şekil 8.56'da, 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan ve 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşıl原因ıcısı girilen Al-Cu alaşımının SEM ve EDX görüntüleri ile numunenin seçilen bölgesinde alaşımın yapısında bulunan elementlerin yüzde oranları görülmektedir. Şekil 8.56.a'da X199 büyütmede korozyona uğramış numune yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 8.56.b'de seçilen bölgede X201 büyütmede Al ve Cu elementlerine renk ataması yapılmış Al-Cu alaşımının renkli alan haritalama SEM görüntüsü görülmektedir. Mavi renkli bölgeler  $\alpha$ -Al matristir. Kırmızı ile renklendirilen noktalar  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiğinin olduğu bölgelerdir. Şekil 8.56.c'de EDX grafiğinde Al ve Cu elementlerinin pikleri görülmektedir. Şekil 8.56.d'de seçilen bölgedeki Al ve Cu elementlerinin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Buna göre; Al ve Cu elementlerinin ağırlıkça yüzde oranları, %68,57 Al, %31,43 Cu ve atomik yüzde oranları, %83,71 Al, %16,29 Cu elementinden ibarettir.



(a)



(b)



(c)

Element	Seri	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	K-serisi	47.97	68.57	83.71	2.3
Bakır	K-serisi	21.99	31.43	16.29	0.6
Toplam:		69.96	100.00	100.00	

(d)

**Şekil 8.56** 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan, 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılama ilave edilen Al-Cu alaşımı. (a) X199 büyütmede numunenin siyah beyaz SEM görüntüsü. (b) X201 büyütmede Al ve Cu elementleri için renk ataması yapılmış numunenin alan haritalama SEM görüntüsü. (c) Al ve Cu elementlerinin EDX grafiği. (d) Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılama ilave edilen Al-Cu alaşımının seçilen bölgesinde bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

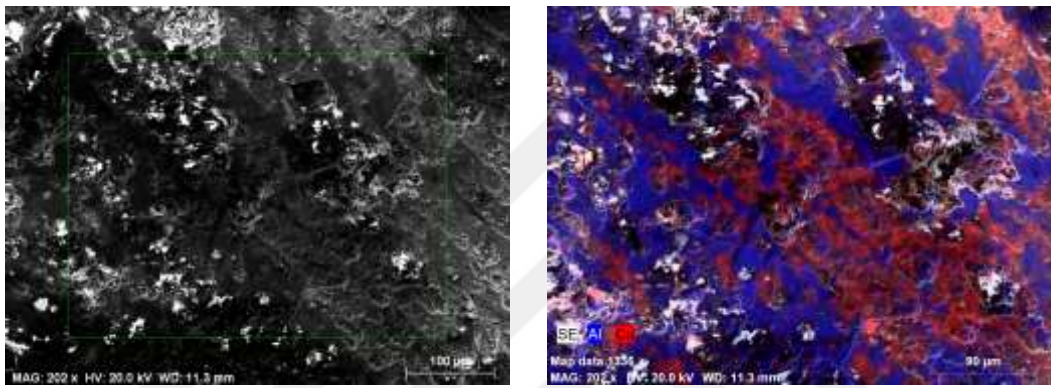
#### 8.7.1.4 Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ile Aşılama Al-Cu Alaşımının Daldırmalı Korozyon SEM

##### İnceleme Sonuçları

Şekil 8.57’de, 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan ve 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılama ilave edilen Al-Cu alaşımının SEM ve EDX görüntüleri ile numunenin seçilen bölgesinde alaşımın yapısında bulunan elementlerin yüzde oranları görülmektedir.

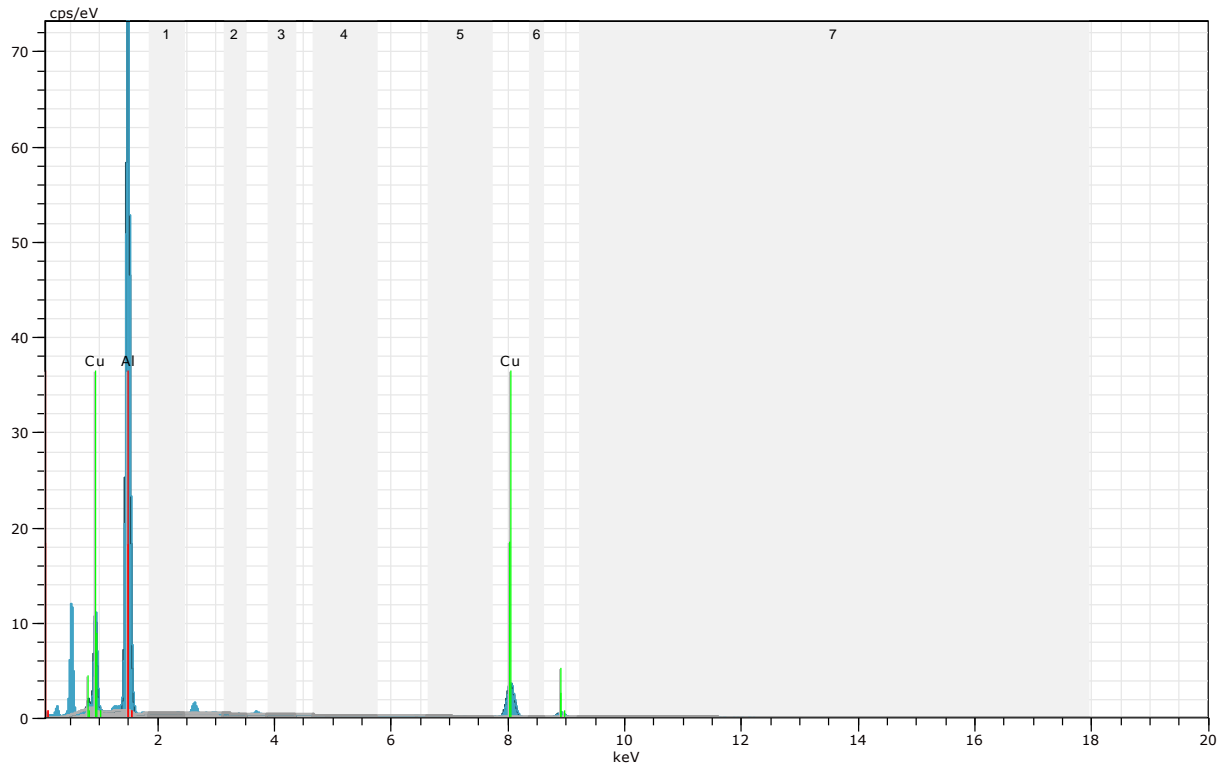


Şekil 8.57.a'da X202 büyütmede daldırmalı korozyona uğramış numune yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 8.57.b'de seçilen bölgede X202 büyütmede Al ve Cu elementlerine renk ataması yapılmış Al-Cu alaşımının renkli alan haritalama SEM görüntüsü görülmektedir. Mavi renkli bölgeler  $\alpha$ -Al matristir. Kırmızı ile renklendirilen noktalar  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiğinin olduğu bölgelerdir. Şekil 8.57.c'de EDX grafiğinde Al ve Cu elementlerinin pikleri görülmektedir. Şekil 8.57.d'de seçilen bölgedeki Al ve Cu elementlerinin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Buna göre; Al ve Cu elementinin ağırlıkça yüzde oranları, %71,79 Al, 28,21 Cu ve atomik yüzde oranları, %85,70 Al, %14,30 Cu' dır.



(a)

(b)



(c)

Element	Seri	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Alüminyum	K-serisi	59.05	71.79	85.70	2.8
Bakır	K-serisi	23.20	28.21	14.30	0.7
Toplam:		82.25	100.00	100.00	

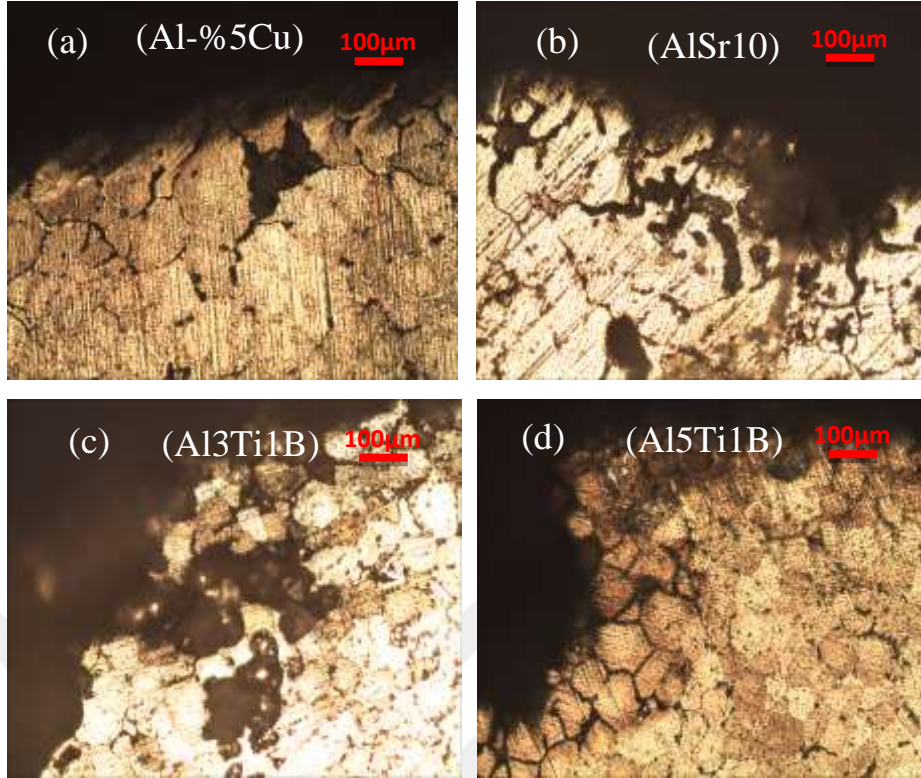
## (d)

**Şekil 8.57** 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan, 590 saat Daldırmalı Korozyona maruz bırakılan Al5Ti1B aşılama ilave edilen Al-Cu alaşımı. (a) X202 büyütmede numunenin siyah beyaz SEM görüntüsü. (b) X202 büyütmede Al ve Cu elementleri için renk ataması yapılmış numunenin alan haritalama SEM görüntüsü. (c) Al ve Cu elementlerinin EDX grafiği. (d) Al5Ti1B aşılama ilave edilen Al-Cu alaşımının seçilen bölgesinde bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları.

### 8.7.2 Daldırmalı Korozyon Yüzeyaltı (Subsurface) İnceleme Sonuçları

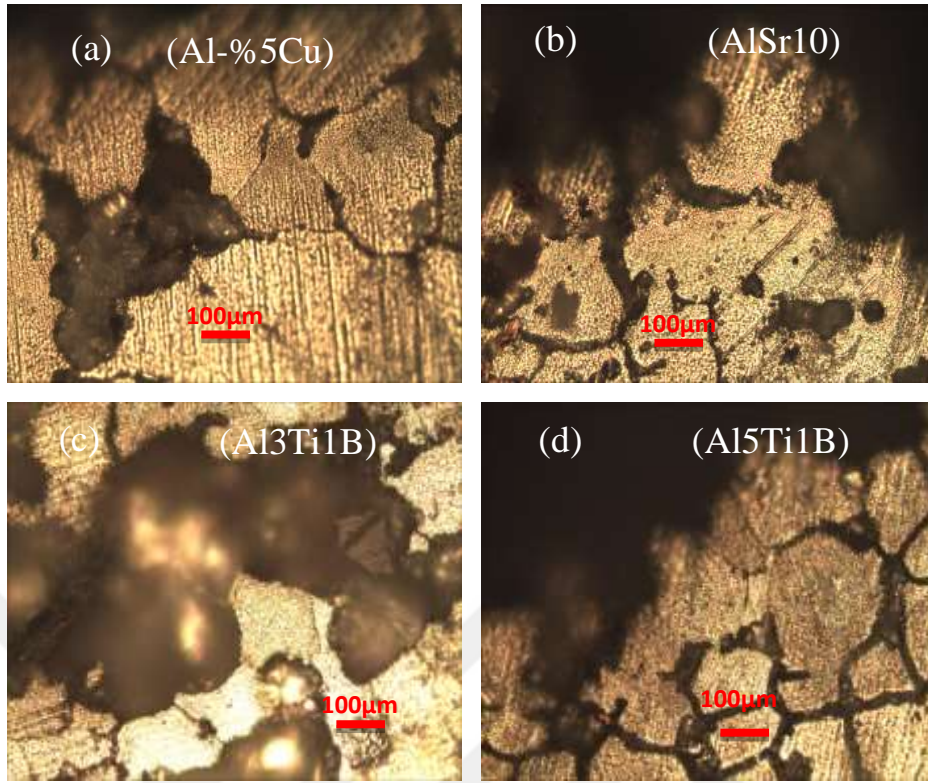
175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan ve 25°C'de 590 saat daldırmalı korozyona maruz bırakılan 4 farklı Al-Cu alaşımlarının korozyon davranışını belirlemek amacıyla bu numuneler yüzeyaltı (subsurface) işlemine tabi tutulmuştur. Silindirik şekilli olan numunelerin alt yüzeyinin 3 mm yukarı kısmından kesilerek, bu yüzey temizlenmiş, parlatılmış ve keller çözeltisi ile dağlanmış. Daha sonra korozyona uğrayan silindirik yüzeylerin keskin kenar bölgeleri optik mikroskop altında incelenerek farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. Deney sonucunda elde edilen görüntülerde; galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu ve tane sınırı korozyon çeşitlerinin meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 8.58'de 175°C'de 18 saat yaşlandırılan, 25°C'de 590 saat daldırmalı korozyon uygulanan dört farklı Al-Cu alaşımının **X200** büyütmedeki yüzeyaltı (subsurface) mikro yapıları görülmektedir. Yüzeyaltı (subsurface) mikro yapı görüntülerinde galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu ve tane sınırı korozyonu çeşitleri bulunmaktadır.



**Şekil 8.58** 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan, 25<sup>0</sup>C’de 590 saat daldırmalı korozyon uygulanan dört farklı Al-Cu alaşımının **X200** büyütmedeki yüzeyaltı (subsurface) mikro yapılarında; galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu ve tane sınırı korozyonu çeşitleri görülmektedir. **(a)** Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı **(b)** AlSr10 tane inceltici ile aşıl原因 Al-Cu alaşımı **(c)** Al3Ti1B tane inceltici ile aşıl原因 Al-Cu alaşımı **(d)** Al5Ti1B tane inceltici ile aşıl原因 Al-Cu alaşımı.

Bu çalışmadaki deneyler sonucunda elde edilen görüntülerde; galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu ve tane sınırı korozyon çeşitlerinin meydana geldiği görülmektedir. Şekil 8.59’da 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan, 25<sup>0</sup>C’de 590 saat daldırmalı korozyon uygulanan dört farklı Al-Cu alaşımının **X500** büyütmedeki yüzeyaltı (subsurface) mikro yapıları görülmektedir. Yüzeyaltı (subsurface) mikro yapı görüntülerinde galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu ve tane sınırı korozyonu çeşitleri mevcuttur.



**Şekil 8.59** 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılan, 25<sup>0</sup>C'de 590 saat daldırmalı korozyon uygulanan dört farklı Al-Cu alaşıımının X500 büyütmedeki yüzeyaltı (subsurface) mikro yapılarında; galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu ve tane sınırı korozyonu çeşitleri görülmektedir. **(a)** Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı **(b)** AlSr10 tane inceltici ile aşılanan Al-Cu alaşımı **(c)** Al3Ti1B tane inceltici ile aşılanan Al-Cu alaşımı **(d)** Al5Ti1B tane inceltici ile aşılanan Al-Cu alaşımı.

## 8.8. MATLAB Grafik Çizimleri

İki veya üç boyutlu grafik çizimleri için kullanılan Matlab grafikleri matris tabanlı bir grafik sistemine sahiptir. Gelişmiş bir matematiksel hesaplama programı olan MATLAB kullanılarak en basitten en karmaşığa kadar her türlü matematiksel işlem kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu çalışmada Matlab grafik çizimleri ile Yaşlandırma süresi [Saat], ortalama tane boyutu [ $\mu\text{m}$ ], akma dayanımı [ $\sigma_{0,2}$ ], Brinell sertlik [HB], aşınma [ $\text{mg}/\text{mm}^2$ ] ve daldırmalı korozyon [ $\text{mg}/\text{mm}^2$ ] deneylerinden elde edilen verilerle üçlü kombinezonlar kurulmuştur.

Matlab çizimleri ile önce [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] grafikleri; aşılaiıcı girilmeyen Al-Cu ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılaiıcıları girilen Al-Cu alaşımlarının deneylerinden elde edilen verilerle her alaşım grubu için ayrı ayrı çizilmiştir. Daha sonra [Aşınma - ortalama tane boyutu – akma dayanımı], [Daldırmalı korozyon – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ve [Brinell sertlik – ortalama tane boyutu – yaşlandırma süresi] deneylerinden elde edilen verilerle üçlü kombinezonlar halindeki Matlab grafikleri çizilmiştir.

### 8.8.1. [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] İlişkisi

Bu çalışmada 18 saate kadar yaşlandırma süresi verileri saat olarak, (d) sembolüyle gösterilen ortalama tane boyutu verileri [ $\mu\text{m}$ ] olarak ve ( $\sigma_{0,2}$ ) sembolüyle gösterilen akma dayanımı verileri [MPa] değerleriyle Matlab grafiğinde çizilmiştir.

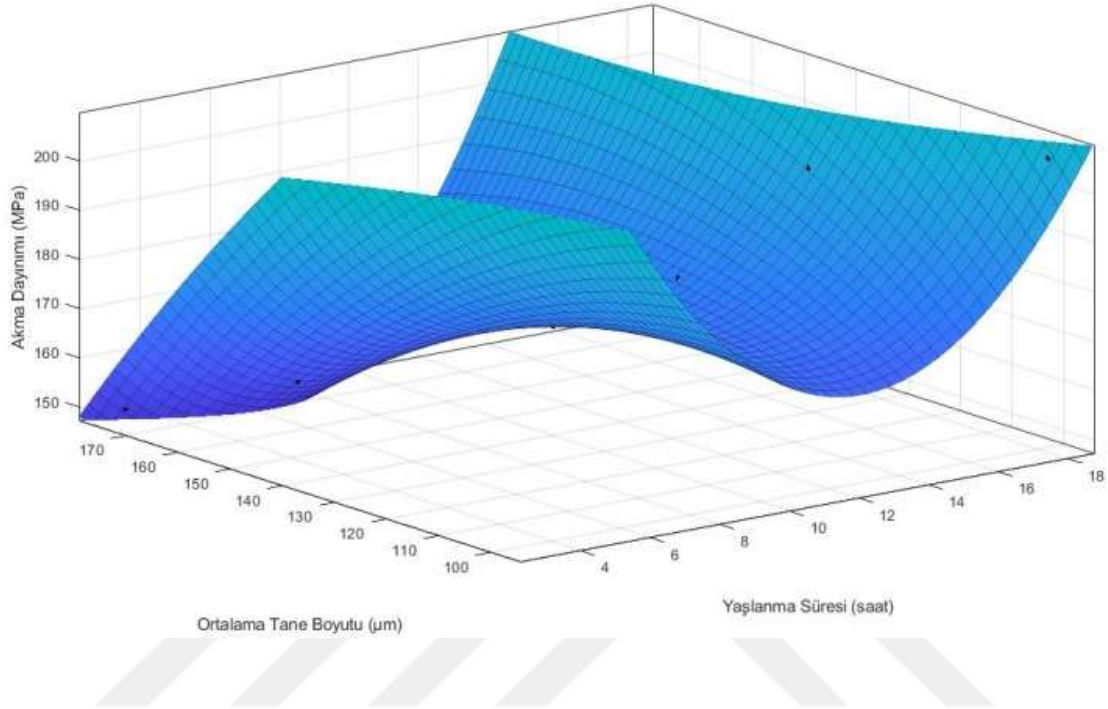
#### 8.8.1.1. Al-Cu Alaşımı için [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği çizimleri

Şekil 8.60'da tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımının [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği görülmektedir.

Matlab grafiğinde x eksenini  $175^{\circ}\text{C}$ 'de saat olarak yaşlandırma süresini, y eksenini  $\mu\text{m}$  cinsinden ortalama tane boyutunu ve z eksenini MPa olarak akma dayanımı değerlerini göstermektedir. Grafikte çizilen eğrilerin fonksiyonu [ $f(x,y) = p_{00} + p_{10} \cdot x + p_{01} \cdot y + p_{20} \cdot x^2 + p_{11} \cdot x \cdot y + p_{02} \cdot y^2$ ] formülüyle verilmiştir. Bu fonksiyon yardımıyla noktalar arasında kalan bölgelerdeki eğrinin değerleri de elde edilebilir.



Şekil 8.60'daki Matlab grafiğine göre, yaşlandırma süresinin atışıyla doğru orantılı olarak akma dayanımı artış göstermektedir. Yaşlanma süresi ve akma dayanımı, ortalama tane boyutu ile ters orantılıdır. Yaşlanma süresi ve akma dayanımının artmasıyla ortalama tane boyutu değerleri azalma göstermektedir.



Şekil 8.60 Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımının [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafik çizimleri.

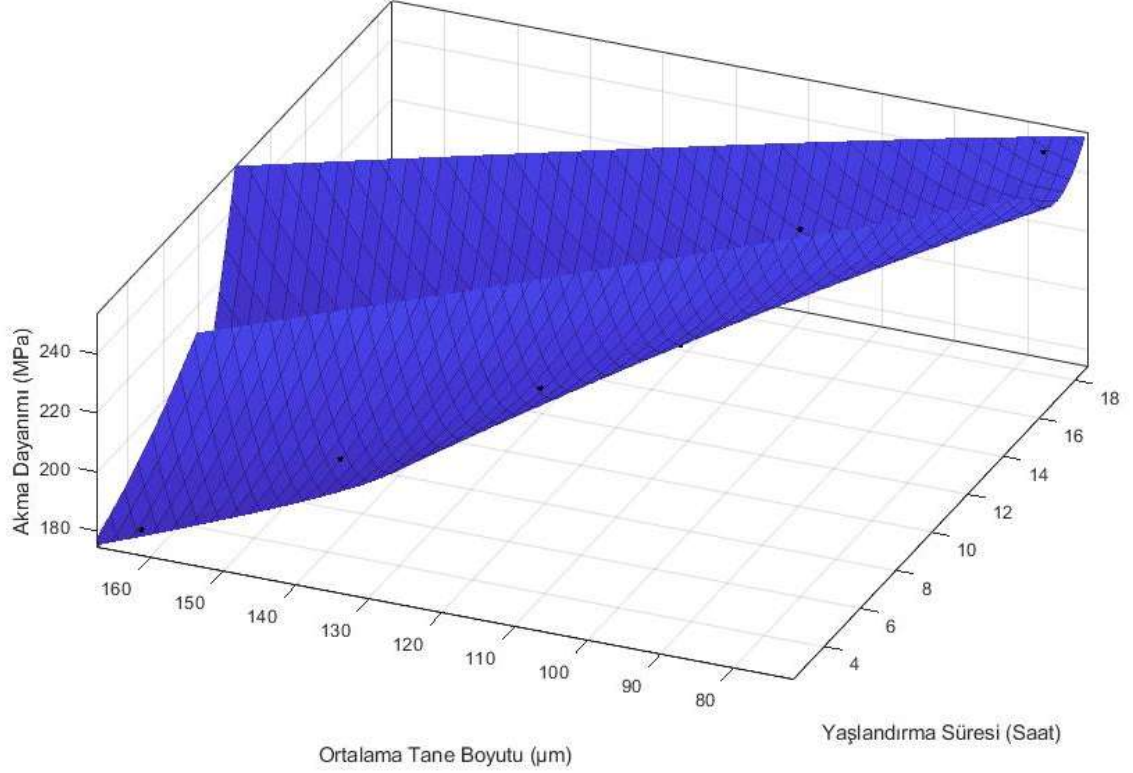
### 8.8.1.2 AlSr10 ile aşıl原因 Al-Cu alaşımı için [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği çizimleri

Şekil 8.61'de AlSr10 ile aşıl原因 Al-Cu alaşımının [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği çizimleri görülmektedir.

Matlab grafiğinde x eksenini 175°C'de saat olarak yaşlandırma süresini, y eksenini µm cinsinden ortalama tane boyutunu ve z eksenini MPa olarak akma dayanımı değerlerini göstermektedir. Grafikte çizilen eğrilerin fonksiyonu  $[f(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2]$  formülüyle verilmiştir. Bu fonksiyon yardımıyla noktalar arasında kalan bölgelerdeki eğrinin değerleri elde edilebilir.

Şekil 8.61'deki Matlab grafiğine göre, yaşlandırma süresinin atışıyla doğru orantılı olarak akma dayanımı artış göstermektedir. Yaşlanma süresi ve akma dayanımı,

ortalama tane boyutu ile ters orantılıdır. Yaşlanma süresi ve akma dayanımının artmasıyla ortalama tane boyutu değerleri azalma göstermektedir.



**Şekil 8.61** AlSr10 ile aşıl原因 Al-Cu alaşımının [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafik çizimleri.

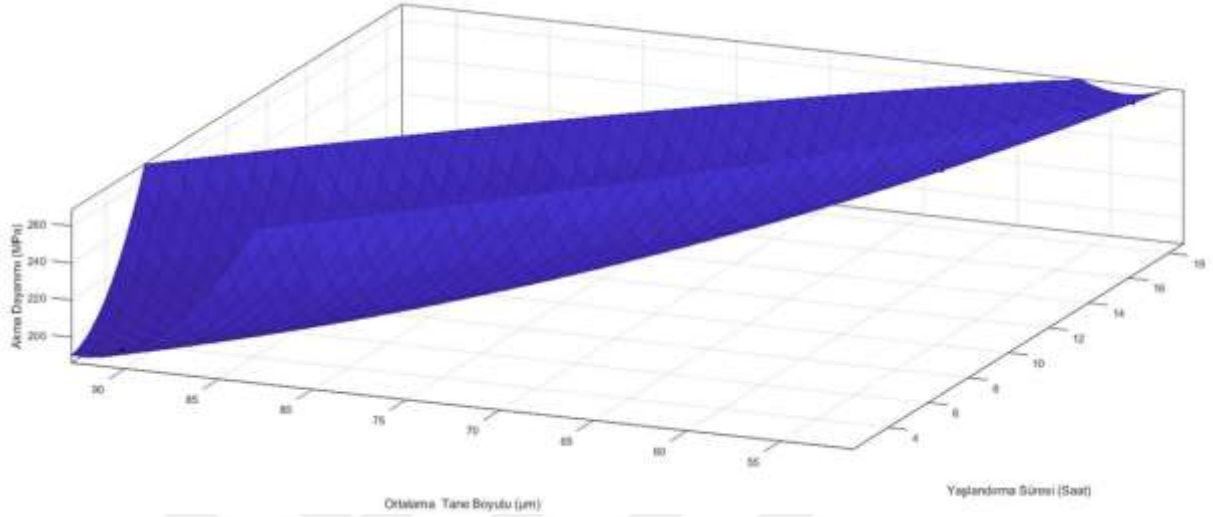
### 8.8.1.3. Al3Ti1B ile aşıl原因 Al-Cu alaşımı için [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği çizimleri

Şekil 8.62’de Al3Ti1B ile aşıl原因 Al-Cu alaşımının [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği görülmektedir.

Matlab grafiğinde x eksenini 175<sup>0</sup>C’de saat olarak yaşlandırma süresini, y eksenini µm cinsinden ortalama tane boyutunu ve z eksenini MPa olarak akma dayanımını göstermektedir. Grafikte çizilen eğrilerin fonksiyonu  $[f(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2]$  formülüyle verilmiştir. Bu fonksiyon yardımıyla noktalar arasında kalan bölgelerdeki eğrinin değerleri elde edilebilir.

Şekil 8.62’deki Matlab grafiğine göre, yaşlandırma süresinin atışıyla doğru orantılı olarak akma dayanımı artış göstermektedir. Yaşlanma süresi ve akma dayanımı,

ortalama tane boyutu ile ters orantılıdır. Yaşlanma süresi ve akma dayanımının artmasıyla ortalama tane boyutu değerleri azalma göstermektedir.



**Şekil 8.62** Al3Ti1B ile aşıl原因 Al-Cu alaşımının [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafik çizimleri.

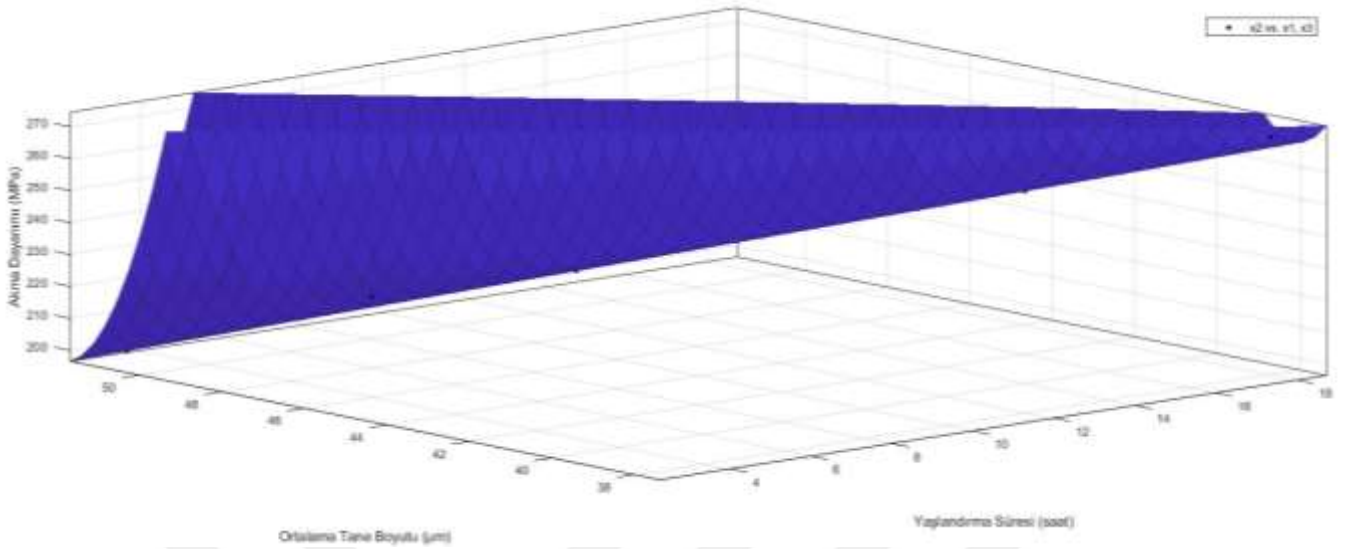
#### 8.8.1.4. Al5Ti1B ile aşıl原因 Al-Cu alaşımı için [Yaşlandırma Süresi - Tane boyutu - Akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafiği çizimleri

Şekil 8.63'te Al5Ti1B ile aşıl原因 Al-Cu alaşımının [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafik çizimleri görülmektedir.

Matlab grafiğinde x eksenini 175<sup>0</sup>C'de saat olarak yaşlandırma süresini, y eksenini cinsinden ortalama tane boyutunu ve z eksenini MPa olarak akma dayanımı değerlerini göstermektedir. Grafikte çizilen eğrilerin fonksiyonu  $[f(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2]$  formülüyle ifade edilmiştir. Bu fonksiyon yardımıyla noktalar arasında kalan bölgelerdeki eğrinin değerleri elde edilebilir.

Şekil 8.63'teki Matlab çizimlerine göre, yaşlandırma süresinin atışıyla doğru orantılı olarak akma dayanımı artış göstermektedir. Ortalama tane boyutu ile Yaşlanma süresi ve akma dayanımı ters orantılıdır. Yaşlanma süresi ve akma dayanımının artmasıyla ortalama tane boyutu değerleri azalma göstermektedir.



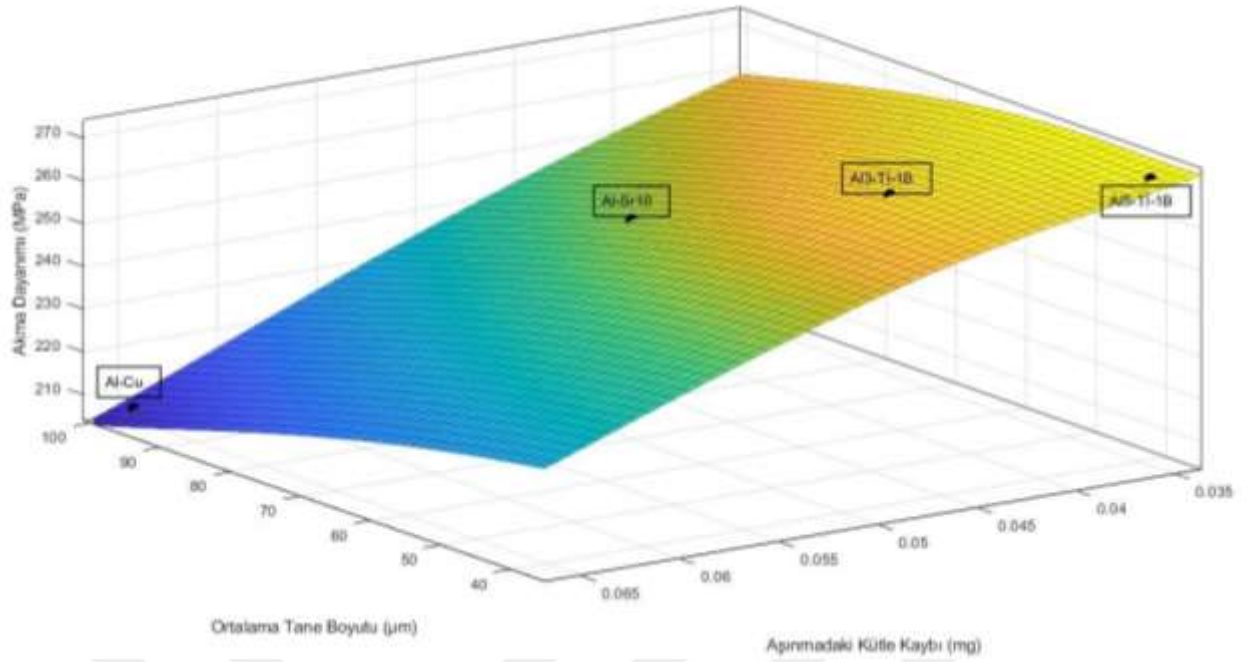


**Şekil 8.63** Al5Ti1B ile aşıl原因 Al-Cu alaşımasının [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisinin Matlab grafik çizimi.

### 8.8.2. [Aşınma – Tane boyutu - Akma dayanımı] İlişkisi için Matlab grafiği

Şekil 8.64'te 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılan; aşıl原因ı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşıl原因ı girilen Al-Cu alaşımlarının; 40 newton yük altında, 3000 m kayma mesafesinde; miligram cinsinden aşınma deneyindeki kütle kaybı, µm cinsinden ortalama tane boyutu ve MPa olarak akma dayanımı değerlerinin ilişkisini gösteren Matlab grafik çizimi görülmektedir.

Şekil 8.64'deki grafiğe göre akma dayanımı ile ortalama tane boyutu ters orantılıdır. Akma dayanımının artmasıyla ortalama tane boyutu azalmaktadır. Aşınma değerleri en fazla aşıl原因ı girilmeyen Al-Cu alaşımında 0,0653 mg olarak bulunmuştur. Aşınma değerleri en az Al5Ti1B ile aşıl原因ı Al-Cu alaşımında 0,0351 mg olarak bulunmuştur.

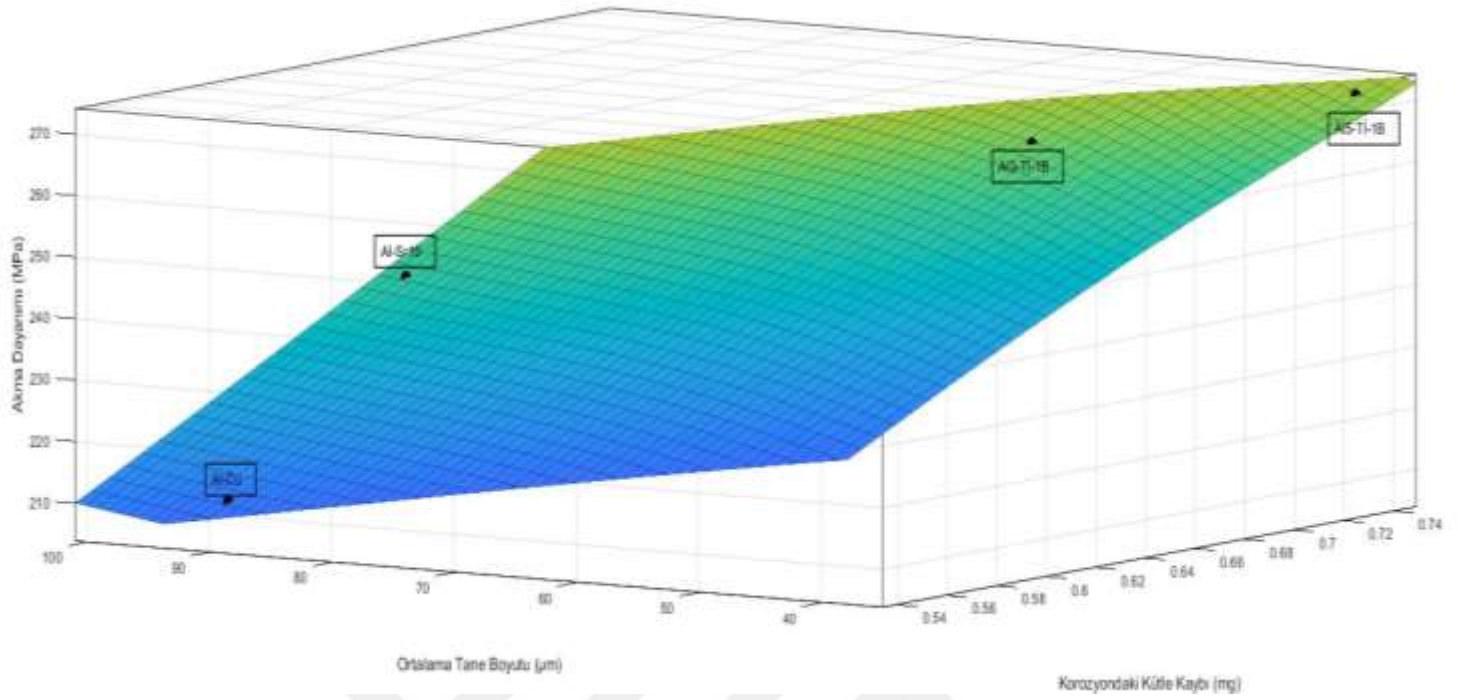


**Şekil 8.64** 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan; aşılaiıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılaiıcı girilen Al-Cu alaşımının 40 newton yük altında 3000 m kayma mesafesinde; [aşınma kütle kaybı – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisini gösteren Matlab grafik çizimi.

### 8.8.3. [Daldırmalı korozyon - Tane boyutu - Akma dayanımı] İlişkisi için Matlab grafik çizimi

Şekil 8.65’te 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan; aşılaiıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılaiıcıları girilen Al-Cu alaşımının, 27<sup>0</sup>C’de tuzlu su/asidik ortamda, 590 saat daldırmalı korozyon sonucunda; [korozyondaki kütle kaybı – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisini gösteren Matlab grafik çizimi görülmektedir.

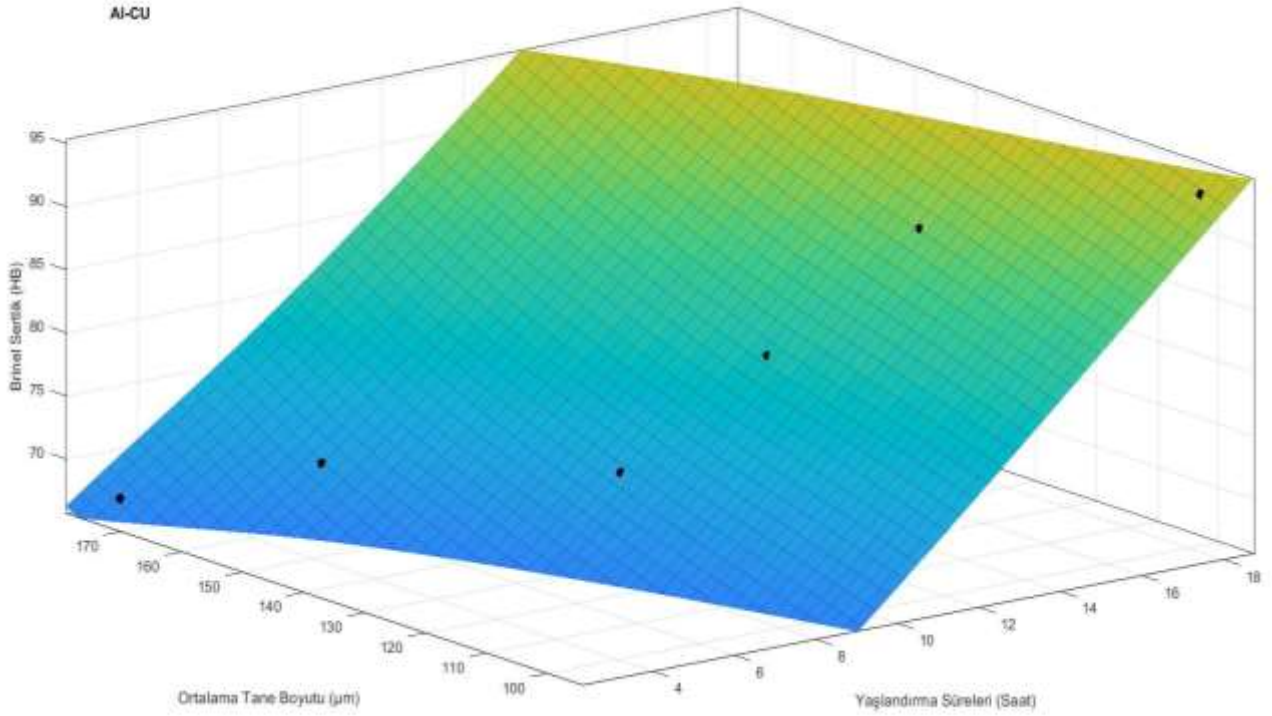
Bu grafiğe göre akma dayanımı ile ortalama tane boyutu ile ters orantılıdır. Akma dayanımının artmasıyla ortalama tane boyutu azalmaktadır. 25<sup>0</sup>C sıcaklıkta 590 saat daldırmalı korozyon uygulanan alaşımarda elde edilen daldırmalı korozyon değerleri en fazla Al5Ti1B aşılaiıcısı girilen Al-Cu alaşımında 0,7395 mg olarak bulunmuştur. Daldırmalı korozyon değerleri, Al3Ti1B ile aşılaiılan Al-Cu alaşımında 0,6832 mg ve aşılaiıcı girilmeyen Al-Cu alaşımında 0,5808 mg olarak bulunmuştur. Daldırmalı korozyon değerleri en az AlSr10 ile aşılaiılan Al-Cu alaşımında 0,5437 mg olarak bulunmuştur.



**Şekil 8.65** 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan; aşılaiıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılaiıcıları girilen Al-Cu alaşımının, 25<sup>0</sup>C’de tuzlu su/asidik ortamda, 590 saat daldırma korozyon sonucunda; [korozyondaki kütle kaybı – ortalama tane boyutu – akma dayanımı] ilişkisini gösteren Matlab grafik çizimi.

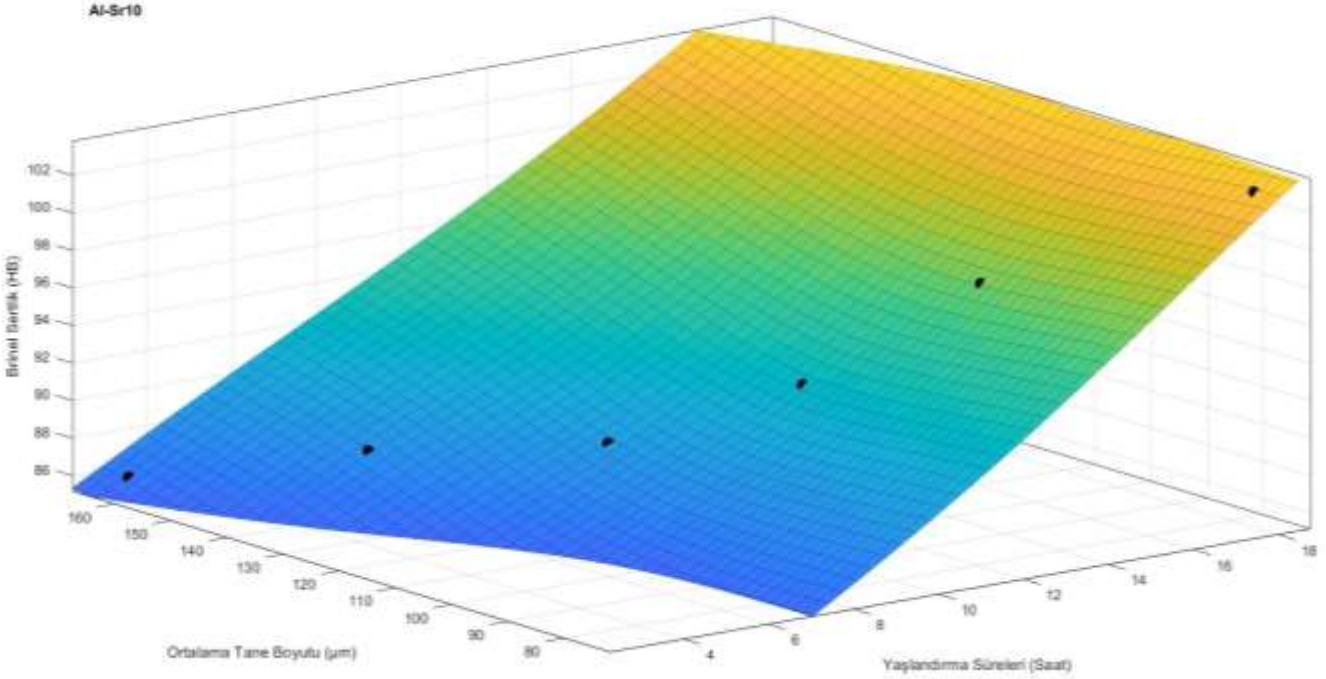
#### 8.8.4. Sertlik - Tane boyutu - Yaşlandırma süresi ilişkisi için Matlab grafiği çizimi

Şekil 8.66’da 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan Al-Cu alaşımının, [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – Brinell sertlik] ilişkisini gösteren Matlab grafik çizimleri görülmektedir. Bu grafiğe göre yaşlandırma süresinin artmasıyla Brinell sertlik doğru orantılı olarak artmakta ve ortalama tane boyutu ters orantılı olarak azalma göstermektedir.



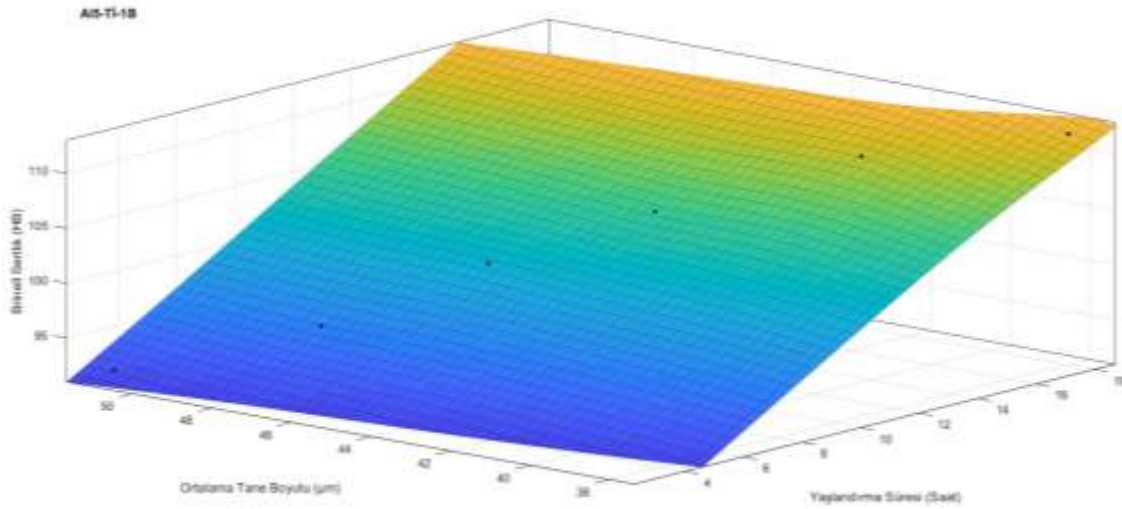
**Şekil 8.66** 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan aşılaiıcı girilmeyen Al-Cu alaşımının, [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – Brinell sertlik] ilişkisinin Matlab grafik çizimi.

Şekil 8.67’de 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan AlSr10 aşılaiıcısı ilave edilen Al-Cu alaşımının, [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – Brinell sertlik] ilişkisinin Matlab grafiği görölmektedir. Şekil 8.67’deki grafiğe göre yaşlandırma süresinin artmasıyla Brinell sertlik doğru orantılı olarak artmakta ve ortalama tane boyutu ters orantılı olarak düşme göstermektedir.



**Şekil 8.67** 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan AlSr10 aşıluyıcısı ilave edilen Al-Cu alaşımının, [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – Brinell sertlik] ilişkisinin Matlab grafik çizimi.

Şekil 8.68’de 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan Al5Ti1B aşıluyıcısı ilave edilen Al-Cu alaşımının, [yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – Brinell sertlik] ilişkisinin Matlab grafik çizimleri görülmektedir. Bu grafiğe göre yaşlandırma süresinin artmasıyla Brinell sertlik değerleri doğru orantılı olarak artmakta ve ortalama tane boyutu değerleri ters orantılı olarak azalma göstermektedir.



**Şekil 8.68** 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılan Al5Ti1B aşıluyıcısı ilave edilen Al-Cu alaşımının, yaşlandırma süresi – ortalama tane boyutu – Brinell sertlik ilişkisinin Matlab grafiği.



## 9. TARTIŞMA

### 9.1. Mikro Yapı ve Tane Boyutu Analizlerinin Değerlendirilmesi

Saf halde yumuşak bir metal olan alüminyum, alaşım elementleriyle alaşımlandığında mekanik özelliklerinde yüksek değerler elde edilebilmektedir. Özellikle bakırlı alüminyum alaşımları yüksek dayanım istenilen malzemeler için tercih edilmektedir. Alüminyumun bakır ile alaşımlandırılmasıyla sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin arttığı bilinmektedir. Alüminyum bakır alaşımlarındaki bakır oranının artmasıyla sertlik ve dayanım artmaktadır. Fakat Al-Cu denge diyagramından da görüleceği üzere (Şekil 5.1) yaşlandırma mekanizması uygulanacak Al-Cu alaşımlarında  $\alpha$ -Al bölgesinde bakır oranı en fazla % 5,6 Cu oranında olabilir.

Bu çalışmada Al-%5Cu alaşımının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi iki aşamalı olarak yapılmıştır. Birincisi AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane incelticilerle aşıl原因arak, ikincisi T6 ısıt işleminde yapay yaşlandırma uygulamak suretiyle gerçekleştirilmiştir.

Tane incelticiler AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B olarak seçilmiştir. Bu tane incelticilerin %0,6 oranında girilmesiyle en efektif sonuçların elde edildiği (Ming-Yu Xie ve ark., 2014) daha önce yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. 2014 yılında yapılan bu çalışmada Al5Ti1B tane incelticisi kullanılarak, ortalama tane boyutu 70  $\mu\text{m}$  ve çekme gerilmesi 435 MPa olarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada ise 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma sonunda Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu 38  $\mu\text{m}$  ve maksimum çekme dayanımı 417 MPa olarak bulunmuştur.

Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane incelticilerin aşıl原因ıcı olarak beraber girilerek yapıldığı (Sigworth ve Kuhn, 2007) bir çalışmada, 20 ppm B girilerek alüminyum alaşımı için ortalama tane boyutu 200  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Ayrıca Sigworth ve Kuhn, %0,10 Ti ilavesinin tane inceltme prosesinde en etkili bir yöntem olduğunu göstermişler ve bu değerden daha fazla titanyum elementi girilmesinin tane inceltmede önemli bir etkisinin olmadığını iddia etmişlerdir.

Çolak ve ark., (2009), tane inceltme işleminde Ti ve B elementlerinin birlikte kullanılmasıyla teşekkül eden kararlı (TiB<sub>2</sub>) titanyum borür bileşiğinin iyi bir heterojen çekirdekleyici olduğunu ve TiB<sub>2</sub> partiküllerinin sıvı alüminyum içinde çözünmeyerek çekirdekçik olarak davrandıklarını göstermişlerdir. Alüminyum ve alüminyum

alaşımına tane inceltme amacıyla Ti ve B elementleri birlikte girildiğinde, bu iki element hem birbirleriyle ve hem de  $\alpha$ -Al matris ile intermetalik bileşik yaparlar. Bu intermetalik bileşikler sıvı fazdaki alüminyum atomlarının çekirdeklenmeleri için alt tabaka görevi görmektedirler (Koşatepe, A., 2019).

Alüminyum bakır alaşımına Al5Ti1B aşılama eklendiğinde oluşan titanyum borür (TiB<sub>2</sub>) bileşiği, titanyum alüminat (TiAl<sub>3</sub>) bileşiğini kendisine bağlayarak çekirdekçik etkisini artırır. Sıvı alüminyum bakır alaşımına eklenen Al5Ti1B aşılama çözünerek serbest hale gelen Ti elementi, alaşımın nihai yapısını kolonsal dentritik yapıdan, eş eksenli tane yapısına dönüştürür (Fan ve ark., 2015).

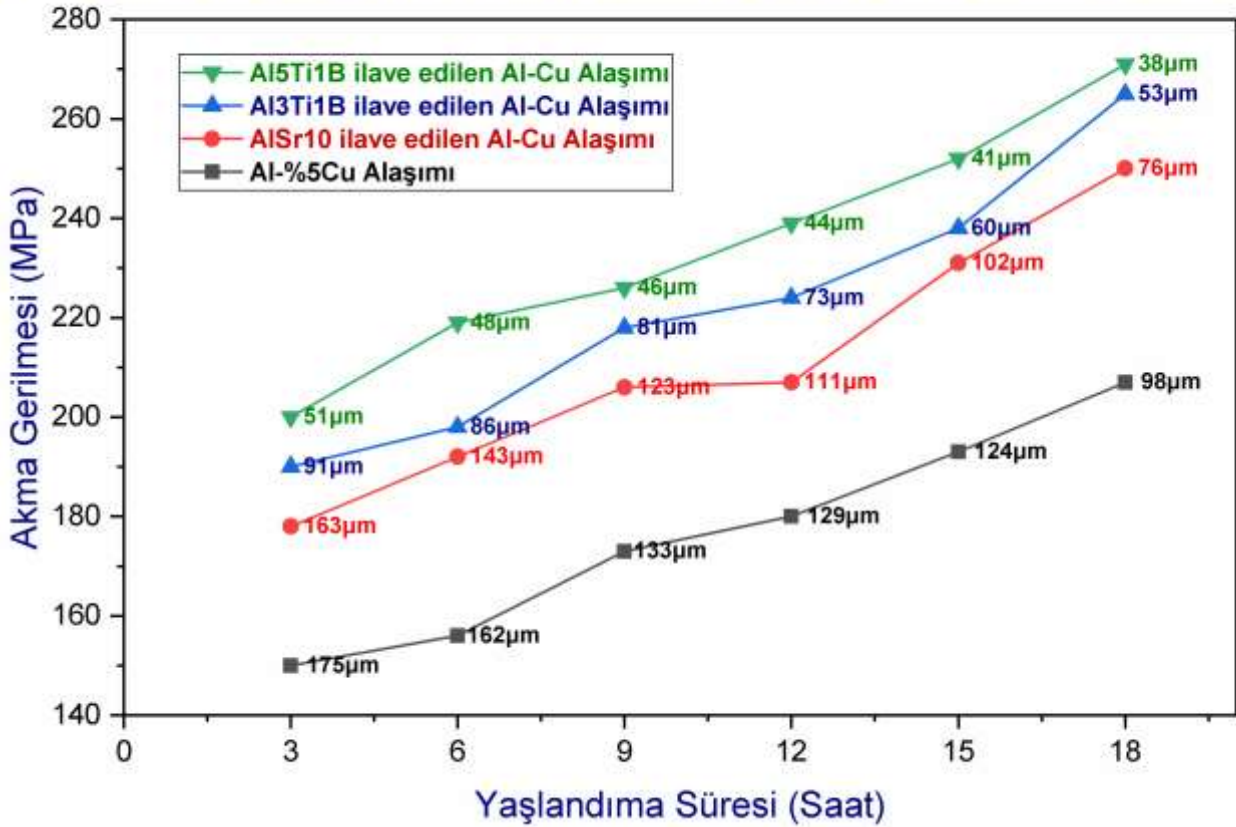
Sıvı alüminyum alaşımına ilave edilen Al5Ti1B aşılama ierlerinin, tane inceltme etkileri zamanla azalmaktadır. Dolayısıyla Al5Ti1B tane incelticisi sıvı alüminyum alaşımına ilave edildikten sonra 25 dakikaya kadar tane inceltme işleminde etkin olup bu süreden sonra tane inceltme etkisi azalmaktadır (Çolak ve ark., 2009). Çolak ve arkadaşları; başlangıçtaki 560  $\mu$ m olan ortalama tane boyutunun aşılamaadan 25 dakika sonra 195  $\mu$ m değerine düştüğünü, 60 dakika sonra ise tanelerin tekrar kabalaşarak 300  $\mu$ m ortalama tane boyutu değerine çıktığını göstermişlerdir.

Birru, Karunakar ve Mahapatra, (2012), A206 alüminyum döküm alaşımında ergimiş sıvı metaldeki döküm sıcaklığı ile tane boyutu arasında bir ilişki olduğunu göstermişler, yaptıkları çalışmada optimum döküm sıcaklığını 750°C olarak belirlemişlerdir.

Al-%5Cu alaşımının içeriğinde bulunan Fe elementi oranının %0,15 Fe oranından fazla olması çekme gerilmesi, akma gerilmesi ve yüzde uzama değerlerini olumsuz etkilemektedir (Liu, Cao ve Chen, 2014).

Şekil 9.1'de 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat yaşlandırılan; aşılama girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılama ierleri girilen Al-Cu alaşımının; ortalama tane boyutu ile akma dayanımı ilişkisi görülmektedir.

### 175 C'de Yaşlandırılan Al-Cu Alaşımlarının Tane Boyutu - Akma Gerilmesi İlişkisi



Şekil 9.1 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C sıcaklıkta altı farklı sürelerde yaşlandırılan; aşılmalı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılmalı girilen Al-Cu alaşımlarının; ortalama tane boyutu ile akma dayanımı ilişkisi.

Bu çalışmada; Şekil 8.2, Şekil 8.3, Şekil 8.4 ve Şekil 8.5.'te mikro yapıları incelediğimiz zaman, 175°C'de 3 saat yaşlandırma sonucunda oluşan kristal tanelerini dentritik yapıları olarak niteleyebiliriz. Fakat 6 saat yaşlandırmadan sonra taneler ve tane sınırları çok net olarak görülmektedir ve bu tane yapısını eş eksenli taneler olarak ifade edebiliriz.

Şekil 8.2, Şekil 8.3, Şekil 8.4 ve Şekil 8.5.'te görülen ortalama tane boyutu grafiklerini incelediğimizde; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B gibi üç farklı aşılmalı girilen Al-Cu alaşımlarının 175°C'de 3 saat yaşlandırma sonucunda; ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 175 µm, 163 µm, 91 µm ve 51 µm olarak elde edilmiştir. Tane boyutu inceltmede AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılmalı girilenlerin ortalama tane boyutu inceltme etkileri sırasıyla % 7, % 48 ve % 70 olarak gerçekleşmiştir. Uygulanan ısıl işlem parametreleri aynı şartlarda olmak şartıyla yaşlandırma süresinin 6, 9, 12, 15 ve 18 saat süreleri için yukarıda sözü geçen



dört farklı Al-Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerlerini inceleyelim. Buna göre 175°C'de **6 saat** yaşlandırma süresinde; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 162 µm, 143 µm, 86 µm ve 48 µm değerlerindedir. 175°C'de **9 saat** yaşlandırma süresinde; tane inceltici girilmeyen, AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 133 µm, 123 µm, 81 µm ve 46 µm değerlerindedir. 175°C'de **12 saat** yaşlandırma süresinde; tane inceltici girilmeyen, AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 129 µm, 111 µm, 73 µm ve 44 µm değerlerindedir. 175°C'de **15 saat** yaşlandırma süresinde; tane inceltici girilmeyen, AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 124 µm, 102 µm, 60 µm ve 41 µm değerlerindedir. Yine aynı şekilde 175°C'de **18 saat** yaşlandırma süresinde; tane inceltici girilmeyen, AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; 98 µm, 76 µm, 53 µm ve 38 µm değerlerindedir.

Şimdi de 18 saat yaşlandırma sürelerinin tane inceltme etkilerini inceleyelim. Yaşlandırma süresinin artmasıyla ortalama tane boyutları da küçülmektedir. Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımının, 175°C'de 3 saat yaşlandırma süresinde 175 µm değerinde olan ortalama tane boyutu, 175°C'de 18 saat yaşlandırma süresinin sonunda %44 oranındaki küçülme ile 98 µm değerine düşmüştür. AlSr10 aşılavıcı girilen Al-Cu alaşımının 175°C'de 3 saat yaşlandırma süresindeki 163 µm olan ortalama tane boyutu, 175°C'de 18 saat yaşlandırmada süresi sonunda %54 oranında bir küçülme ile 76 µm değerine düşme göstermiştir. Al3Ti1B aşılavıcı girilen Al-Cu alaşımının 175°C'de 3 saat yaşlandırma süresindeki 91 µm olan ortalama tane boyutu, 175°C'de 18 saat yaşlandırmada süresinde %42 oranında bir azalma ile 53 µm değerine küçülme göstermiştir. Al5Ti1B aşılavıcı girilen Al-%5Cu alaşımının 175°C'de 3 saat yaşlandırma süresindeki 51 µm olan ortalama tane boyutu, 175°C'de 18 saat yaşlandırmada süresinde %26 oranında bir azalma ile 38 µm değerine düşme göstermiştir. 175°C'de 18 saat yaşlandırma süresinde AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılavıcılarının tane inceltme oranları sırasıyla; %23, %46 ve %62 oranındadır. Böylece 175°C'de 18 saat yaşlandırma süresinde Al5Ti1B tane incelticisinin en etkili aşılavıcı olduğu görülmektedir. Al3Ti1B ile Al5Ti1B tane incelticilerin B elementi oranları eşit olduğundan, titanyum elementinin artmasıyla, ortalama tane boyutu değerlerinde küçülme meydana gelmiştir.

### 9.1.1. Çekirdeklenme ve Tane Büyümesine Aşıl原因ıcıların Etkileri

Biol, Y., 2012,  $AlB_3$  mastır alaşımı ile  $AlSi10Mg$  ve  $AlSi12Cu$  alüminyum döküm alaşımlarının tane inceltilmesi üzerinde çalışmıştır.  $Al-Cu$  eriyiğinde  $Ti$  bulunmaması şartıyla  $B$  elementinin hemen hemen tamamının  $AlB_2$  parçacıkları oluşturarak,  $\alpha-Al$  kristalleşmeye başlamadan kısa süre önce bu alüminyum borür parçacıklarının mükemmel heterojen çekirdekçikler teşkil ettiklerini ileri sürmüştür.

Bo ve ark., 2019,  $T7$  ısıl işlemler uygulanmış farklı miktarlarda  $Cu$  ve  $Fe$  içeren basınçlı  $Al-Cu$  döküm alaşımlarının mikro yapı gelişimi ve mekanik özelliklerini, optik mikroskop, tarama elektron mikroskobu yöntemleriyle araştırmışlardır. Sonuç olarak, basınçlı  $Al-Cu$  alaşımlarının daha iyi ve kapsamlı mekanik özelliklerinin  $Fe$  ve  $Cu$  içerikleri tasarlanarak elde edildiğini göstermişlerdir. Bu sonuçları,  $\alpha-Al$  matrisinde bulunan çökelti partiküllerinin oranının artmasına ve nano boyutlu demir açısından zengin intermetaliklerin oluşumuna bağlamışlardır.  $Al-6.5Cu-0.6Mn-1.0Fe$  alaşımının nihai çekme gerilmesini, akma gerilmesini ve yüzde uzama değerlerini, sırasıyla 314 MPa, 293 MPa ve % 6 olarak elde etmişlerdir.

Tongmin, W., ve ark., (2012),  $Al-Si$  alaşımları için aşıl原因ıcı etkisinin azalmasına dirençli yeni bir  $Al-3Ti-3B$  tane incelticisi üzerinde çalışmışlardır. Aşıl原因madan sonra etki süresini uzatmak amacıyla  $TiB_2$ ,  $AlB_{12}$  ve  $TiAl_3$  partiküllerini içeren yeni bir  $Al-3Ti-3B$  tane inceltici mastır alaşım geliştirmişler ve 30 dakika süreye kadar aşıl原因ıcının özelliğini kaybetmediğini göstermişlerdir.

Dong, X., ve ark., (2017),  $Al3Ti3B$  mastır alaşımı ile  $AlSi9Mg$  yüksek silikonlu döküm alaşımının tane boyutunu inceltilerek alaşımın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde çalışmışlardır.  $TiB_2$  ve  $TiAl_3$  partiküllerinin  $Al5Ti1B$  mastır alaşımında bir arada bulunduğunu doğrulamışlardır.  $Al3Ti3B$  mastır alaşımı ilavesiyle alaşımın mukavemetinin artmasını, birincil  $\alpha-Al$  tanelerinin tane boyutlarının inceltilmesine bağlamışlardır.

Jiehua, L., ve ark., (2017),  $Al-7Si$  alaşımlarında, katıl原因ma sırasında alüminyumun kristallerinin çekirdeklenmesinin,  $AlB_2$  üzerinde heterojen çekirdeklenme şeklinde olduğunu göstermişlerdir.  $AlB_2$  ve  $Al$  arasındaki ara yüzeyde yarı kararlı bir  $SiB_6$  tabakasının oluşabileceğini ve bu tabakanın katıl原因ma sırasında  $Si$  gibi başka bir kararlı faza dönüştüğünü ileri sürmüşlerdir.

Easton, M.A., ve ark., (2016), hafif metal ve alaşımların tane inceltilmesinde son gelişmeler üzerinde çalışmışlardır. Tane boyutunun inceltilmesini kontrol eden iki kilit

faktör olduğunu ileri sürerek bu iki faktörü, katılaşmanın başlangıcında sıvı metal içerisinde bulunan çekirdekçikler ve Q ile gösterilen büyüme kısıtlama oranı olarak ifade etmişlerdir. Burada çekirdekçiklerin boyutu, dağılımı ve yoğunluğunun nihai yapıdaki tane boyutunu belirleyici faktör olduğu tezini ileri sürmüşlerdir. Ayrıca alaşımın kimyasal yapısı tarafından belirlenen büyüme kısıtlamasının, çekirdeklenmeyi başlatmak için gereken aşırı soğumayı belirlediğini ve oluşan çekirdekçiklerin hayatta kalmasını kolaylaştırdığını ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada 535<sup>0</sup>C'de 4 saat çözeltiye alınan, 25<sup>0</sup>C'de suda su verilen, 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılan; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane incelticilerle aşıl原因 Al-Cu alaşım numunelerinin XRD analizlerinde seçilen bölgelerde bulunan ve çekirdekçik özelliği taşıyan intermetalik bileşikler ve bunların seçilen bölgelerdeki ağırlıkça yüzde oranları Çizelge 8.2, Çizelge 8.3 ve Çizelge 8.4'te mukayeseli olarak verilmiştir.

Çizelge 8.4'te bu çalışmada tane boyutu inceltmede en etkili olan Al5Ti1B tane incelticisinin içeriğinde bulunan ve çekirdekçik özelliği gösteren, sıvı metal içinde bulunan kararlı TiB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti, AlB<sub>2</sub> ve  $\theta$ -CuAl<sub>2</sub> bileşiklerinin ağırlıkça yüzde oranlarının, Al3Ti1B aşıl原因 ilave edilen alaşım numunelerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Sonuç olarak Al5Ti1B ile aşıl原因 Al-%5Cu alaşım numunesinin tane boyutunun, diğer aşıl原因lar olan AlSr10 ve Al3Ti1B'a göre daha ince yapıli olmasını, Al5Ti1B aşıl原因ısının içeriğindeki çekirdek yapıcı bileşiklerin daha yüksek oranda olmasına bağlayabiliriz.

Çizelge 8.2'de 535<sup>0</sup>C'de 4 saat çözeltiye alınan, 25<sup>0</sup>C'de suda su verilen, 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılan; AlSr10 ile aşıl原因 Al-%5Cu alaşım numunesinin XRD analizinde seçilen bölgede bulunan ve çekirdekçik özelliği taşıyan AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr bileşikleri ve bunların seçilen bölgelerdeki ağırlıkça yüzde oranları görülmektedir. Çekirdek yapıcı AlSr bileşiğinin Al<sub>4</sub>Sr bileşiğine göre yaklaşık iki misli daha fazla olduğu görülmektedir.

### 9.1.2 Çekirdeklenme ve büyüme aşamasında alt tabakaların rolü

Alüminyum döküm alaşımlarında tane yapısı önemli ve kolaylıkla gözlemlenebilir bir özelliktir. Sıvı eriyikten katılaştıran alüminyum alaşımlarında, kolonsal/sütunlu dentritik tane yapısı, ikiz sütunlu dentritik yapı ve eş eksenli tane yapısı olmak üzere üç farklı tane yapısı mümkündür. Eş eksenli büyüme sırasında oluşan taneler, pek çok farklı büyüme noktalarından dışa doğru küresel olarak büyürler ve ortam sıvısına gizli ısıyı salarlar.

Alüminyum alaşımlarında tane inceltme işlemiyle, kaba sütunlu dentritik tane yapısının, ince eş eksenli tane yapısına döndürülmesi amaçlanır. Bunu gerçekleştirmek için yapılan işleme tane inceltme denilir ve döküm aşamasından hemen önce aşılama girilerek yapılır.

Bir tane incelticinin etkili olabilmesi için, üzerinde heterojen çekirdeklenmenin meydana gelebileceği çok sayıda kararlı alt tabakayı sıvı eriyiğe sokmak gerekir. Daha sonra bu alt tabakalar üzerinde katı çekirdekçikler teşekkül ederler ve büyürler.

Alüminyum alaşımlarının tane inceltmesinde katı çubuklar halinde hazırlanmış olan mastır alaşımlar kullanılır. Pek çok çeşidi olan bu mastır alaşımlar sıvı eriyik içine ilave edildikleri zaman çözünürler ve ortaya bazı bileşikler çıkar. İşte bu bileşikler çekirdeklenme için alt tabaka (substrate) görevi görürler. Bu çalışmada Al-5Ti-1B ve AlSr10 mastır alaşımları kullanılmıştır. Al-5Ti-1B mastır alaşımı sıvı içinde eridiği zaman ortaya  $TiAl_3$ ,  $TiB_2$  ve  $AlB_2$  bileşikler çıkmaktadır. AlSr10 mastır alaşımı sıvı içinde eridiği zaman AlSr ve  $Al_4Sr$  bileşikler ortaya çıkmaktadır. Bahsi geçen bu bileşikler çekirdeklenme prosesinde alt tabaka olarak bulunurlar.

### 9.1.3 Tane İnceltme Mekanizmaları

Prensip olarak tane inceltme mekanizmaları basittir. İlk olarak çok sayıda güçlü heterojen çekirdeklenme bölgesi eriyik içine dahil edilmelidir. Alüminyum alaşımına mastır alaşımlar eklendiğinde bu mastır alaşım eriyerek metaller arası bileşik (intermetalik) parçacıklarını eriyik içine bıraktığı kabul edilmektedir. Çekirdekler teşekkül ettikten sonra bu çekirdeklerin büyümesi aşaması vardır. İnce taneli bir tane yapısı elde etmek için, çekirdeklenen tanelerin büyümesi çok hızlı olmamalıdır. Aksi takdirde ilk oluşan çekirdekler hızla büyüyecek ve çekirdeklenme alanlarını tüketecek ve böylece başka çekirdeklerin oluşması için yer kalmayacaktır.

İlk kapsamlı tane inceltme çalışmalarından biri (Cibula, 1949), tarafından ortaya konulmuştur. Onun çalışmasında tane inceltme işleminde Ti ve B elementlerinin etkinliği açıkça ortaya konmuştur.

Daha sonraları (Glasson ve Emley., 1968), tane inceltme konusunu iyi bir şekilde irdeledikten sonra tane inceltme mekanizmaları üzerine peritektik teori ve borür teorisi olarak iki kapsamlı teori geliştirmişlerdir.

Peritektik teori ilk olarak (Crossley ve Mondolfo, 1951) tarafından geliştirilmiştir. Bu teori mastır alaşımların etkisini Al-Ti ikili denge faz diyagramındaki peritektik reaksiyona bağlar. Bu reaksiyon:  $Sıvı + TiAl_3 = \alpha-Al_{(katı)}$  şeklinde gösterilir. Al-Ti-B mastır alaşımlarının, özellikle solmaya ilişkin çok daha düşük performansı B elementinin Al-Ti faz denge diyagramı üzerindeki etkisi ile açıklanmıştır. Eritektik teoriye göre; B elementinin rolü, peritektik bileşimi %0,15 Ti'dan faz diyagramının Al köşesine doğru kaydırarak ( $TiAl_3$ ) titanyum alüminid kristallerinin çok düşük Ti ekleme seviyelerinde bile termodinamik açıdan kararlı olmasını sağlamaktır.

Borür teorisi ilk olarak Cibula tarafından öne sürülmüştür. Ti ve B elementinin beraber ilave edilmesiyle, (Cibula, 1951, ile Jones ve ark., 1976), erimiş alaşım içerisinde dağılan  $TiB_2$  parçacıklarının heterojen çekirdeklenme merkezleri olarak hareket ettiğini ileri sürmüşlerdir.  $TiB_2$  kararlı bileşiği erimiş alüminyumda hemen hemen çözünmez.

Alüminyum alaşımına tane inceltici olarak Al-5Ti-1B ilave edildiğinde, eriyik içinde mastır alaşımın erimesiyle ortaya  $TiAl_3$  bileşiği çıkmaktadır.  $TiAl_3$  bileşiği eriyik içinde çözüldüğü zaman ortaya Ti elementi çıkmaktadır.

Çözünmüş titanyumun tane büyümesini kısıtlayan yüksek derecede seçmeli bir element olarak rolünü ve bunun tane inceltmeyi teşvik etmekteki önemini, (Maxwell ve Hellawell, 1975)'in çözünen element teorisi açık bir şekilde göstermiştir. Bunlar elde ettikleri tane inceltmeyle ilgili sonuçları, birim hacimdeki partikül sayısına karşılık, birim hacimdeki tanecik sayısını grafikler biçiminde sundular. Bu grafiklerde görüldüğü üzere, düşük değerlerde; birim hacimdeki partikül sayısı ile birim hacimdeki tanecik sayısını, 1:1 oranında buldular. Fakat partikül sayısı kritik bir değeri aştıktan sonra, partikül sayısının artmasıyla çekirdek sayısı artmaz, sabit kalır. Böylece tüm potansiyel alt taneler üzerinde çekirdeklenme meydana gelmez.

Bunun nedeni, alüminyumun büyümesiyle ortaya çıkan gizli ısının banyo sıcaklığını, çekirdeklenme sıcaklığının üzerine yükselterek, daha fazla çekirdeklenme olayını bastırmasıdır.

## 9.2. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B aşıl原因ıcıları girilerek toplamda dört grup Al-%5Cu alaşımlarıyla çalışılmıştır. Bu alaşımlara; 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırma uygulandıktan sonra çekme koparma deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışmada 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma süresi sonucunda, en yüksek çekme dayanımları olarak; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen alaşımların çekme dayanımları küçükten büyüğe sırasıyla; 278 MPa, 303 MPa, 336 MPa ve 386 MPa olarak bulunmuştur.

Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımının 18 saat yaşlanmada 278 MPa olan çekme dayanımı, AlSr10 aşıl原因ıcı ilave edildiği zaman %8 oranında artış göstererek 303 MPa değerine yükselmiştir. Al3Ti1B aşıl原因ıcı ilave edildiğinde %20 oranında bir artış göstererek 336 MPa değerine ulaşmıştır. Al5Ti1B aşıl原因ıcı ilave edildiğinde %35 oranında bir artış ile 386 MPa değerine yükselmiştir.

Bu çalışmada aşıl原因ıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı 175°C'de 18 saat yaşlandırıldığında 278 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. AlSr10 aşıl原因ıcısının Al-Cu alaşımının tane boyutunu inceltmede etkisi vardır fakat Ti ve B elementleri kadar etkili değildir. AlSr10 aşıl原因ıcısı girilen ve 175°C'de 18 saat yaşlandırılan Al-Cu alaşımının çekme dayanımı 303 MPa olarak elde edilmiştir.

Al3Ti1B ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımı 175°C'de 18 saat yaşlandırıldığında çekme dayanımı 336 MPa olarak elde edilmiştir. Al3Ti1B ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımının çekme dayanımı AlSr10 ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımından yüksektir fakat Al5Ti1B ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımının çekme dayanımından daha düşüktür. Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane incelticilerin B elementi oranları eşit olduğundan Ti elementi oranının yüksek olması, Ti elementinin çekme dayanımını artırmada daha etkili olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada en yüksek çekme deneyi sonuçları Al5Ti1B tane inceltici mastır alaşımı ile aşıl原因anan Al-Cu alaşımının 175°C'de 18 saat yaşlandırılmasıyla 386 MPa olarak elde edilmiştir.

Al-%5Cu alüminyum bakır alaşımının çekme dayanımı, akma dayanımı gibi mekanik özellikleri, tane inceltici girilerek ve T6 yapay yaşlandırma ısı işlemi uygulanarak arttırılmıştır.

Çekme dayanımı özelliğindeki bu artış oranı, 175°C’de 3 saat yaşlandırma sonucunda AlSr10 tane incelticisi ile %25 oranında (253 MPa) ve 18 saat yaşlandırma ısıl işlemiyle %19 oranında (303 MPa) arttırılmıştır.

175°C’de 3 saat yaşlandırma sonucunda Al3Ti1B tane incelticisi girilerek çekme dayanımı %34 oranında (271 MPa) ve 18 saat yaşlandırma ısıl işlemiyle %24 (336 MPa) oranında bir ilave artış sağlanmıştır.

175°C’de 3 saat yaşlandırma sonucunda Al5Ti1B tane incelticisi ilave edilerek çekme dayanımında %41 (285 MPa) oranında ve 18 saat yaşlandırma ısıl işlemiyle %35 (386 MPa) oranında bir ilave artış elde edilmiştir.

#### Aşılایıcıların ve Yaşlandırmanın (Rm) Çekme gerilmesini artırma oranları

Tane incelticiler	Aşılایıcıların Etkisi		18 Saat Yaşlandırma Etkisi	
	(%)	Rm (MPa)	(%)	Rm (MPa)
Al-%5Cu	00	201	38	278
AlSr10	25	253	19	303
Al3Ti1B	34	271	24	336
Al5Ti1B	41	285	35	386

### 9.3. Akma Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B olarak üç farklı aşılایıcı girilerek toplamda dört grup Al-%5Cu alaşımına; 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiyeye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C’de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırma uygulanmıştır.

Bu alaşımlara uygulanan çekme koparma işleminden sonra elde edilen Akma dayanımlarının deney sonuçları Şekil 8.39.’da görülmektedir.

Bu çalışmada 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırma süresi sonucunda, en yüksek akma dayanımları olarak; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen alaşımların akma dayanımları küçükten büyüğe doğru sırasıyla; 207 MPa, 250 MPa, 265 MPa ve 271 MPa olarak bulunmuştur.

Tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımının 18 saat yaşlanmada 207 MPa olan akma dayanımı, AlSr10 aşılایıcı ilave edildiği zaman %20 oranında artış göstererek

250 MPa değerine yükselmiştir. Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılایıcı ilave edilen Al-Cu alaşımasının akma dayanımı %28 oranında bir artış göstererek 265 MPa değerine ulaşmıştır. Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılایıcı ilave edilen Al-Cu alaşımasının akma dayanımı %31 oranında bir artış ile 271 MPa değerine yükselmiştir.

AlSr<sub>10</sub> tane inceltici girilen alaşımın akma dayanımı, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımına göre daha yüksektir. Diğer yandan Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici girilen alaşımın akma dayanımı da AlSr<sub>10</sub> tane inceltici girilen alaşımın akma dayanımından daha yüksektir.

Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılایanan Al-Cu alaşımasının akma dayanımı, AlSr<sub>10</sub> ile aşılایanan Al-Cu alaşımasının akma dayanımından yüksektir fakat Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılایanan Al-Cu alaşımasının akma dayanımından daha düşüktür. Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane incelticilerin B elementi oranları eşit olduğundan Ti elementinin akma dayanımını artırmada daha etkili olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada en yüksek akma deneyi sonuçları Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane inceltici mastır alaşımı ile aşılایanan Al-Cu alaşımasının 175<sup>0</sup>C’de 18 saat yaşlandırılmasıyla 271 MPa olarak elde edilmiştir.

#### 9.4. Yüzde Uzama Değerlerinin Değerlendirilmesi

Malzemelerin çekme koparma testleri yapıldıktan sonra çekme gerilimleri, akma gerilimleri ve yüzde uzama değerleri birlikte elde edilir. Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr<sub>10</sub>, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B, Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B olarak üç farklı aşılایıcı girilerek toplamda dört grup Al-Cu alaşımlarına; 535<sup>0</sup>C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25<sup>0</sup>C’de suda su verme, 175<sup>0</sup>C’de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırma uygulanmıştır. Daha sonra bu numunelere çekme koparma deneyleri uygulanmıştır. Çekme koparma deneyinden elde edilen yüzde uzama değerleri Şekil 8.40’ta görülmektedir.

Malzemelerin yüzde uzama değerleri bize malzemenin gevrek veya sünek olduğu hakkında bilgi verir. Genel olarak alüminyum bakır alaşımları için %5 uzama oranının altındaki değerlere sahip olan malzemeler gevrek ve kırılğan olarak nitelendirilir. Bu çalışmada elde ettiğimiz yüzde uzama değerleri maksimum %5,33 ile minimum %1,43 arasında elde edilmiştir. Böylece bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçlara göre Al-%5Cu alaşımlarının gevrek malzeme olduğunu ifade edebiliriz.

Bu çalışmada AlSr<sub>10</sub> ile aşılایanan Al-Cu alaşımı, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılایanan Al-Cu alaşımı, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B ile aşılایanan Al-Cu



alaşımlarının 175<sup>0</sup>C’de **3 saat yaşlandırılma** sonucundaki yüzde uzama değerleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla; %2.80, %3.40, %4.00 ve %5.30 olarak elde edilmiştir. AlSr10 aşılavıcısı girilen Al-Cu alaşımının yüzde uzaması en düşük olarak elde edilmiştir. Böylece AlSr10 ile aşılana Al-Cu alaşımları, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşılana Al-Cu alaşımlarına göre daha gevrek malzeme olduğu söylenebilir.

Al5Ti1B aşılavıcı ilave edilen Al-Cu alaşımının 175<sup>0</sup>C’de **3 saat** yaşlandırılmasıyla, diğer numunelere oranla %5,30 olarak daha yüksek yüzde uzama değeri elde edilmiştir. Bu alaşımı da gevrek malzeme olarak nitelendirebiliriz.

### 9.5. Brinell Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sertlik ölçümleri dört alaşım grubuna uygulanmıştır. Bunlar; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane incelticiler girilmiş olan Al-Cu alaşımlarıdır. Bu numunelere 535<sup>0</sup>C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25<sup>0</sup>C’de suda su verme, 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat gibi farklı sürelerde yapay yaşlandırma uygulanmıştır. Yaşlandırma süresinin artışıyla doğru orantılı olarak Brinell sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca tane inceltici girilmeyen alaşımın sertlik değerleri en düşük iken, en fazla sertlik değerleri Al5Ti1B tane inceltici mastır alaşımı girilen malzemede görülmüştür.

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı, 175<sup>0</sup>C’de **3 saat** yaşlandırma işleminden sonra 67 HB sertlik değeri göstermiştir. Aynı sıcaklıkta 18 saat süreyle yaşlandırmada %40’lık bir yükselme ile 94 HB elde edilmiştir. AlSr10 tane inceltici girilen Al-Cu alaşımı, 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta **3 saat** yaşlandırma sonucunda 86 HB sertlik değeri göstermiştir. 18 saat yaşlandırmada %21’lik bir artışla 103 HB sertlik elde edilmiştir. Al3Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımı, 175<sup>0</sup>C’de **3 saat** yaşlandırma sonrasında 90 HB sertlik bulunmuştur. 18 saat yaşlandırma sonucunda %18’lik bir artışla 105 HB sertlik değeri elde edilmiştir. Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımı, 175<sup>0</sup>C sıcaklıkta **3 saat** yaşlandırmadan sonra 92 HB elde edilmiştir. 18 saat yaşlandırma sonucunda %22’lik bir artış ile 112 HB sertlik değeri elde edilmiştir.

Alüminyum alaşımlarının aşırı yaşlandırma sürecindeki sertlik değerlerini görmek amacıyla seçilen numuneler 39 saat yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuşlardır. Daha sonra bu numunelerin aşırı yaşlanmadaki sertlik değerleri belirlenmiştir. Buna göre; her dört farklı alüminyum alaşımlarının Brinell sertlik değerleri 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saatlik yaşlandırma sürelerinde artış göstermişler ve takibinde 18 saatlik

yaşandırmadan sonraki aşırı yaşlanmada ise sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. En yüksek sertlik değeri Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının 18 saat yaşlandırılması sonucunda 112 HB olarak elde edilmiştir. Yukarıda bahsi geçen her dört grup Al-%5Cu alaşım numunelerinin 18 saat yaşlandırmadan sonra yaşlandırmaya devam edildiğinde sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. 175°C’de 39 saat yaşlandırmaya devam edilmiş ve yaklaşık %10’luk bir azalma meydana gelmiştir. 175°C’de 39 saat yaşlandırma sonunda, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımlarının sertlik değerleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla; 80 HB, 91 HB, 95 HB ve 101 HB olarak elde edilmiştir.

### 9.6 V-Charpy Çentik Darbe Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çentik darbe deneyleri malzemenin sertlik, süneklik ve tokluk gibi metalürjik özellikleri hakkında bilgi verir. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin, ortam sıcaklığına ve uygulanan yükün türüne bağlı olarak hasara uğradıklarını görüyoruz. Malzeme seçimi yapılırken malzemenin sünek mi yoksa gevrek mi kırılacağını bilmek veya hangi sıcaklıkta kırılacağı hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla çentik darbe deneyleri yapılır. Aynı zamanda malzeme kırılırken ne kadarlık bir enerji absorbe edebileceği veya kırılma enerji miktarının ne kadar olabileceği hakkında malzemenin davranışı ile ilgili bilgi sahibi olmak amacıyla çentik darbe deneyleri yapılır. Malzemelerin dinamik yüklere karşı ne kadarlık bir kırılma enerjisine sahip olduğunu belirlemek, ani darbe sebebiyle malzemenin absorbe ettiği enerji miktarını ölçmek, malzemenin süneklik-gevreklik özelliklerini değerlendirmek ve malzemenin hangi sıcaklıklarda sünek hangi sıcaklıklarda gevrek bir davranış sergilediğini belirlemek amacıyla çentik darbe deneyleri yapılır (Anonim, 3/2019).

Şekil 8.41’de, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B üç farklı aşılama girilen Al-%5Cu alaşımlarının; 535°C’de 4 saat çözeltiye alma, 25°C’de suda su verme, 175°C’de 3, 6, 9, 12, 15 ve 18 saat sürelerinde yaşlandırma ısıl işlemi uygulandıktan sonraki V-charpy çentik darbe enerjileri görülmektedir.

175°C’de **3 saat** yaşlandırılan, AlSr10 ile aşılama Al-%5Cu alaşımı, Al3Ti1B ile aşılama Al-%5Cu alaşımı, tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı ve Al5Ti1B ile aşılama Al-%5Cu alaşımlarının V-Charpy çentik darbe enerji değerleri küçükten

büyüğe doğru sırasıyla; 11,50 joule, 15,76 joule, 16,64 joule ve 20,17 joule olarak elde edilmiştir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla V-Charpy çentik darbe enerjilerinde azalma meydana geldiği Şekil 8.41'den görülmektedir.

175°C'de **18 saat** yaşlandırma sonunda, AlSr10 ile aşılana Al-%5Cu alaşımı, Al3Ti1B ile aşılana Al-%5Cu alaşımı, tane inceltici girilmeyen Al-%5Cu alaşımı ve Al5Ti1B ile aşılana Al-%5Cu alaşımının V-Charpy çentik darbe enerji değerleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla; 5.11 joule, 6.48 joule, 8.48 joule ve 9.71 joule olarak bulunmuştur. Yaşlandırma süresinin artmasıyla V-Charpy çentik darbe enerjilerinde azalma meydana gelmektedir.

AlSr10 tane inceltici girilen Al-Cu alaşımının 175°C'de **3 saat** yaşlandırma sonunda V-Charpy çentik darbe enerjisi 11,50 joule iken, 18 saat yaşlandırma sonucunda %56 oranında azalma göstererek 5,11 joule değerine düşmüştür. Malzeme mukavemet kazanıp sertlik değeri yükseldikçe gevreklik kazanmakta dolayısıyla sünekliği azalmaktadır. Al3Ti1B tane inceltici girilen Al-Cu alaşımının V-Charpy çentik darbe enerjisi 175°C'de **3 saat** yaşlandırma sonunda 15,76 joule iken, 18 saat yaşlandırma sonunda %59 oranında azalma göstererek 6,48 joule değerine düşmüştür. Aşılama girilmeyen Al-%5Cu alaşımının V-Charpy çentik darbe enerjisi 175°C'de **3 saat** yaşlandırma sonunda 16,64 joule iken, 18 saat yaşlandırma sonunda %50 oranında azalma göstererek 8,48 joule değerine düşme göstermiştir. Bu çalışmada dört farklı Al-Cu alaşımından sünekliği en yüksek alaşım olan Al5Ti1B tane inceltici girilen Al-%5Cu alaşımının çentik darbe enerjisi **3saat** yaşlandırma sonunda 20,17 joule iken, 18 saat yaşlandırma sonunda %52 oranında azalarak 9,71 joule değerine düşmüştür.

### 9.7. SEM ve EDS Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada dört farklı Al-Cu alaşımı ile çalışılmıştır. Bunlar tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşılana Al-Cu alaşımalarıdır. Bu dört grup Al-Cu alaşımına; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat sürelerinde yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır.

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B aşılama girilen bu dört grup Al-Cu alaşımının, 175°C'de 18 saat yaşlandırılması sonucunda, ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla 98 µm, 76 µm, 53 µm ve 38 µm olarak elde edilmiştir. Tane boyutunun inceltmesi, hem aşılama etkisi hem de yaşlandırma ısıl

işlemiyle birlikte gerçekleştirilmiştir. AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B gibi aşılaiıcıların ve yaşlandırma işleminin, Al-%5Cu alaşımasının tane boyutunu inceltme etkileri Çizelge 9.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 9.1.** AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılaiıcılarının ve yaşlandırma prosesinin, Al-%5Cu alaşımasının tane boyutunu inceltme etkileri

<b>Aşılaiıcılar ilave edildikten ve yaşlandırıldıktan sonra Al-%5Cu Alaşımasının Ortalama Tane Boyutu Değerleri (<math>\mu\text{m}</math>)</b>		
<b>Al-Cu Alaşımına İlave Edilen Aşılaiıcılar</b>	<b>Aşılaiıcıların Tane Boyutunu İnceltme Etkisi</b>	<b>Yaşlandırma Prosesinin Tane Boyutu İnceltme Etkisi (<math>175^{\circ}\text{C}</math>'de 18 saat)</b>
<b>Al-%5Cu İlavesiz</b>	175 $\mu\text{m}$	98 $\mu\text{m}$
<b>Al-%5Cu + AlSr10</b>	163 $\mu\text{m}$	76 $\mu\text{m}$
<b>Al-%5Cu + Al3Ti1B</b>	91 $\mu\text{m}$	53 $\mu\text{m}$
<b>Al-%5Cu + Al5Ti1B</b>	51 $\mu\text{m}$	38 $\mu\text{m}$

Çizelge 9.1’den görüleceği üzere aşılaiıcı girilmeyen ve yaşlandırılmayan Al-Cu alaşımasının ortalama tane boyutu 175  $\mu\text{m}$  değerindedir. Al-Cu alaşımına aşılaiıcı olarak AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ilave edilmesiyle; sırasıyla %7, %48 ve %71 oranlarında tane boyutu inceltme etkisi elde edilerek, bu alaşımların ortalama tane boyutu değerleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla; 163  $\mu\text{m}$ , 91  $\mu\text{m}$  ve 51  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir.

175 $^{\circ}\text{C}$ 'de 18 saat yaşlandırma süreleri sonucundaki ortalama tane boyutu değerlerini karşılaştıralım. Aşılaiıcı girilmeyen Al-Cu alaşımasının başlangıçtaki 175  $\mu\text{m}$  olan ortalama tane boyutu 18 saat yaşlandırma sonunda %44'lük bir azalma ile 98  $\mu\text{m}$  değerine düşmüştür. AlSr10 aşılaiıcı girilen Al-Cu alaşımasının başlangıçtaki 163  $\mu\text{m}$  olan ortalama tane boyutu 18 saat yaşlandırma sonunda %54'lük bir azalma ile 76  $\mu\text{m}$  değerine düşmüştür. Al3Ti1B aşılaiıcı girilen Al-Cu alaşımasının başlangıçtaki 91  $\mu\text{m}$  olan ortalama tane boyutu 18 saat yaşlandırma sonunda %42'lik bir azalma ile 53  $\mu\text{m}$

değerine düşmüştür. Al5Ti1B aşılavıcı girilen Al-Cu alaşımının başlangıçtaki 51 µm olan ortalama tane boyutu 18 saat yaşlandırma sonunda %26'lık bir azalma ile 38 µm değerine düşmüştür.

Bu çalışmada SEM analizlerinde, çekme çubukların kopartıldıktan sonra kırık yüzeylerinden SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizlerinde, numune yüzeyinden seçilen bölgenin belirli bir büyütme oranıyla SEM görüntüleri alınmıştır. Seçilen bölgede bulunan bazı parçaların belirlenmesi amacıyla o noktanın analizleri de yapılmıştır. Noktasal analizde hangi elementlerin bulunduğu, bunların 2θ açıları ve pik şiddetleri EDX diyagramlarıyla gösterilmiştir. Ayrıca bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir.

SEM alan haritalama analizlerinde seçilen bölgedeki elementler farklı renklerle kodlanmıştır. Elementlerin buldukları noktalar ve bölgeler bu renkler sayesinde görülmektedir. Bu renkler sayesinde elementlerin tane büyüklükleri ve dağılımları hakkında çok önemli bilgiler elde edilmektedir. Alaşımında bulunan elementlerin hem tane sınırlarında ve hem de tane içlerinde dağıldıkları görülebilmektedir. SEM analizlerinde, tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımlarında; α-Al matris, Cu, Fe, Si, Mn ve Mg gibi elementler ve bunların ağırlıkça ve atomik yüzde oranları seçilen noktalar ve bölgeler için elde edilmiştir. α-Al matrisin içerisinde bulunan Cu elementi, θ-Al<sub>2</sub>Cu intermetalik bileşiği halindedir ve tane sınırlarında yoğunlaştığı görülmektedir.

AlSr10 aşılavıcı girilen Al-Cu alaşımlarının SEM ve EDX analizlerinde, seçilen alan haritalama yöntemiyle, α-Al matris, Cu, Fe, Si, Mn, Mg ve Sr elementleri mevcuttur. Bu elementlerin pik şiddetleri EDX analizlerinde görülmektedir. Elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları da ayrıca verilmektedir. Sr elementinin AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr intermetalik bileşikler yaptığı XRD analizlerinde görülmektedir.

Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılavıcıları girilen Al-Cu alaşım numunelerinin SEM analizlerinde, seçilen alanın haritalama yöntemiyle yapılan EDX analizinde α-Al matris, Cu, Mn, Mg, Si, Ti ve B elementlerinin mevcut olduğu görülmektedir. EDX analiz diyagramında bu elementlerin pik şiddetleri görülmektedir. Bu elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir.

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B olarak üç farklı aşılavıcı girilerek toplamda dört grup Al-%5Cu alaşımlarına; 535°C sıcaklıkta 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 0, 3, 9, 18 ve 39 saat sürelerinde yaşlandırma uygulanan bu alaşımların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelenmiştir. Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımının SEM görüntüleri Şekil 8.7.'de

görülmektedir. X1024 büyütmede Şekil 8.7.(a)'da gri renkli bölgeler  $\alpha$ -Al matris ve beyaz renkli bölgeler tane sınırları olmak üzere net bir şekilde görülmektedir. Şekil 8.7.(b)'de renklendirilmiş haritalama yöntemiyle aynı bölgeden alınan SEM görüntüsünde, alaşımın içerisinde bulunan Al, Cu, Si, Mn ve Mg elementleri ve bunların renklendirilmiş dağılımları görülmektedir.  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği kırmızı renkli olarak tane sınırlarında biriktiği görülmektedir. Şekil 8.7.(c)'de X500 büyütmede beyaz renkli tane sınırları ve eş eksenli taneler görülmektedir.

Şekil 8.8.(a)'da EDX analizine göre tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımının seçilen bölgesinde bulunan elementlerin pikleri görülmektedir. Buna göre Al, Cu, Si, Mn ve Mg elementlerinin pikleri mevcuttur. Şekil 8.8.(b)'de seçilen bölgede alaşımın yüzeyinde bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzde oranları verilmiştir. Ağırlıkça %90,31 Al ve ağırlıkça %7,17Cu mevcuttur. Atomik olarak %94,29 Al ve %3,18 Cu bulunmaktadır. Cu elementi başlıca  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği halinde tane sınırlarında görülmektedir.

## 9.8. XRD Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Döküm işleminde, sıvı eriyiğin ısısını kaybederek katılaşmasında iki mekanizma vardır. Bunlar çekirdeklenme ve bu çekirdeklerin büyümesi aşamasıdır. Sıvı eriyiğin ısı kaybederek katılaşmasında kristal tanelerinin oluşumunda ilk önce çekirdeklenme meydana gelir. Daha sonra ikinci aşamada bu çekirdeklerin büyüme evresi görülür. Teşekkül eden kristal tanelerinin büyümesi, bu katılaşmış tanelerin birbirleriyle temas ederek büyüme durdurmasına kadar devam eder ve sonuçta katılaşma tamamlanmış olur.

Çekirdeklenme, homojen ve heterojen olarak iki kısma ayrılır. Eğer saf bir malzeme içerisinde empürütelerin olmadığını kabul edersek aşırı soğuma neticesinde homojen çekirdekler teşekkül eder ve bunlar büyüme göstererek katılaşma gerçekleşir. Fakat uygulamaların çoğunda ve alaşımların katılaşmasında heterojen çekirdeklenme meydana gelir. Alaşım içerisinde bulunan empürüteler veya katkı malzemeleri çekirdekçik görevi görürler. Ve bu çekirdekçikler büyüyerek kristal tanelerini oluştururlar. Diğer bir deyişle heterojen çekirdeklenmede oluşan çekirdekçikler bir alt tabakaya ihtiyaç duyarlar. Bu alt tabaka üzerinde çekirdekçikler teşekkül ederler. İşte alaşım içerisinde bulunan empürüteler, kalıp cidarları veya alaşıma bilinçli olarak ilave edilen tane incelticiler bu alt tabaka görevi gören kararlı partikülleri ihtiva ederler. Yani

sıvı metal içerisine ilave edilen aşıluyıcılar çözünerler fakat aynı zamanda çözünmeyen kararlı bileşikler de sıvı metal içinde dağılırlar ve bunlar çekirdeklenme için alt tabaka görevi görürler.

Bu çalışmada sıvı metale ilave edilen AlSr10 tane inceltici çözüdüğü zaman AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr bileşikleri teşekkül ederler. Al<sub>3</sub>Ti1B ile Al<sub>5</sub>Ti1B aşıluyıcıları sıvı metale eklendiği zaman TiB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> bileşikleri teşekkül ederek sıvı metal içinde dağılıp çekirdekçikler için alt tabaka görevi görürler.

İlk olarak çekirdek teşekkül ettikten sonra bu çekirdekçiklerin büyümesi belirli şartlara bağılıdır. Teşekkül eden çekirdek ya büyüme gösterir veya tekrar çözüme göstererek erirler. Bunu belirleyen; çekirdeğin sahip olduğu negatif değerdeki **hacimsel serbest enerji farkı** ile buna zıt değerde olan çekirdekçiğin **yüzey enerjisi** arasındaki farktır. Eğer çekirdekçiğin pozitif değerdeki yüzey enerjisi, negatif hacimsel serbest enerji farkından yüksek ise çekirdekçik büyümez ve çekirdekçik çözünererek erime gösterir. Veya çekirdeğin negatif hacimsel serbest enerji farkı, bu çekirdekçiğin yüzey enerjisinden yüksek ise bu durumda çekirdekçik büyüme gösterir.

Burada bir de katı-sıvı sıcaklık eğrilerinden katılaşıma hızını belirleyen aşırı soğuma kriteri vardır. Sıvı haldeki eriyiğin katılaşıma sırasında katı-sıvı eğrisinin keşiştiği sıcaklık noktası, denge halini gösterir. Bu noktanın altındaki bir sıcaklık değerinde, katı-sıvı arasındaki bölgede, bu sıcaklıkta hem katı hem sıvının aynı anda beraber bulunduğunu gösterir. Denge noktası ile bu noktanın altındaki sıcaklık farkı, aşırı soğuma derecesini gösterir.

Bu çalışmada, alüminyum içerisine %5Cu alaşıma elemanı olarak girilmiştir. Al-Cu faz denge diyagramından, Al içerisnde %5Cu girildiği zaman  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu intermetalik bileşiği teşekkül eder. Al-Cu alaşımaına tane inceltme amacıyla AlSr10, Al<sub>3</sub>Ti1B ve Al<sub>5</sub>Ti1B aşıluyıcılarını ayrı ayrı girdiğimizde, AlSr10, Al<sub>3</sub>Ti1B ve Al<sub>5</sub>Ti1B mastır alaşımları sıvı metal içerisnde çözünererek çok sayıda AlSr, Al<sub>4</sub>Sr, TiB<sub>2</sub>, AlB<sub>2</sub> ve Al<sub>3</sub>Ti intermetalik bileşikleri teşekkül ederek bunlar partikül halinde sıvı metal içerisnde dağılırlar. TiB<sub>2</sub> ve AlB<sub>2</sub> bileşikleri Al erime sıcaklığı olan 660<sup>0</sup>C ve üzerindeki döküm sıcaklıklarında kararlıdırlar ve sıvı metal içinde erime göstermeden varlıklarını korurlar.

İşte kararlı durumda olan AlSr, Al<sub>4</sub>Sr, TiB<sub>2</sub> ve AlB<sub>2</sub> gibi bu bileşikler, sıvı alüminyum alaşımlarının katılaşıma sırasında heterojen çekirdeklenme için alt tabaka görevi görürler. Al<sub>3</sub>Ti bileşiği 660-750<sup>0</sup>C sıcaklık aralığında çözüme gösterir. Al<sub>3</sub>Ti bileşiği çözüdüğü zaman ortaya çıkan Ti elementi, çekirdekçiğin büyümesine olumlu yönde etki eder. TiB<sub>2</sub> çekirdekçik olarak bulunduğunda Al tanecikleri bu çekirdekler

üzerinde büyüme gösterirler. Sıvı metal içerisinde  $Al_3Ti$  bileşiğinin çözünmesiyle ortaya çıkan Ti elementi,  $TiB_2$  çekirdekçiği tarafına doğru difüzyonla hareket ederek çekirdekçiğin büyümesine katkıda bulunur.

Ergimiş sıvı metal içerisinde bulunan çekirdekçiklerin çok sayıda olması katılaşma sonundaki tane boyutunun büyüklüğünü etkiler çünkü çekirdeklerin büyümesi, tanelerin birbirleriyle temas etmesiyle duracaktır. Böylece çekirdek yoğunluğu az olursa taneler daha fazla büyüme göstererek kaba taneli bir morfoloji ortaya çıkaracaktır.

Bu çalışmada  $Al_3Ti_1B$  ve  $Al_5Ti_1B$  tane incelticileri aşılایıcı olarak kullanılmıştır. Bu iki aşılایıcıların B elementi oranları eşit olup  $Al_5Ti_1B$  aşılایıcının Ti oranı daha yüksektir. Deneyler sonunda elde ettiğimiz verilerden Ti oranı yüksek olan aşılایıcının tane boyutu inceltme etkisi daha yüksek olarak bulunmuştur. Bu durum, Ti elementi oranı ne kadar artırılırsa tane boyutu da o oranda incelme gösterecek anlamına gelmemektedir. Çünkü belli bir değerden sonra aşılایıcı olarak girilen Ti elementinin oranı artırılırsa bile tane boyutu incelme oranı sabit kalmaktadır. Yapılan çalışmalarda bu değer %0,6 Ti değeri olarak gösterilmiştir.

Ergimiş sıvı haldeki Al-%5Cu alaşımına aşılایıcı olarak  $AlSr_{10}$  girildiğinde,  $AlSr_{10}$  çözünme göstererek  $AlSr$  ve  $Al_4Sr$  bileşikleri kararlı olarak ortaya çıkmaktadır.  $AlSr$  ve  $Al_4Sr$  bileşikleri, alüminyumun çekirdeklenmesinde çekirdekçikler için alt tabaka olarak davranırlar. Alüminyum taneleri bu çekirdekçikler üzerinde büyüme gösterirler. Bu çalışmada, Al-Cu alaşımına aşılایıcı olarak girilen  $AlSr_{10}$ ,  $Al_3Ti_1B$  ve  $Al_5Ti_1B$  aşılایıcılarının, sıvı alüminyum alaşımı içinde çözünmesiyle ortaya çıkan;  $AlSr$ ,  $Al_4Sr$ ,  $AlB_2$ ,  $Al_3Ti$  ve  $TiB_2$  gibi intermetalik bileşikler, XRD analizlerinde  $2\theta$  açılarında difraksiyon kırınımları göstererek ortaya çıkmışlardır.

$AlSr_{10}$  aşılایıcı girilen alüminyum alaşımlarının XRD analizlerinde,  $2\theta$  açılarında  $AlSr$  ve  $Al_4Sr$  bileşiklerinin pik verdikleri görülmektedir. Çok sayıda olan  $AlSr$  ve  $Al_4Sr$  piklerinin belli başlı olanlarını burada ele alıyoruz.  $2\theta$  açılarında yansıma gösteren bu bileşiklerin hangi açılarda, hangi kristal düzlemlerinde ve hangi şiddette oldukları XRD diyagramlarından görülmektedir. Seçilen bölgede aynı zamanda bu bileşiklerin yüzde oranları da XRD grafiklerinden elde edilerek gösterilmiştir. Bu çalışmada  $AlSr_{10}$  aşılایıcı ilave edilen alaşımlarda  $AlSr$  yüzde oranının,  $Al_4Sr$  yüzde oranına göre yaklaşık iki katı olduğu XRD grafiklerinde görülmektedir.

$Al_3Ti$  ve  $Al_5Ti_1B$  aşılایıcıları ilave edilen Al-Cu alaşımlarında  $AlB_2$ ,  $TiB_2$  ve  $Al_3Ti$  intermetalik bileşiklerinin  $2\theta$  açılarında difraksiyon yansıması yaptıkları XRD



grafiklerinde görülmektedir. XRD grafik analizlerinde  $AlB_2$ ,  $TiB_2$  ve  $Al_3Ti$  bileşiklerinin hangi  $2\theta$  açılarında pik verdikleri, bu piklerin şiddetleri ve kristal kafesi düzlemleri görülmektedir. Seçilen bölgelerde elde edilen XRD difraksiyon yansımalarından bu bileşiklerin yüzde oranları da elde edilmektedir.

Bu çalışmada dört grup Al-Cu alaşım numunelerinin çekme çubuk kırık yüzeylerinden XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizlerinde difraksiyona uğrayan alüminyum elementinin pik şiddetleri görülmektedir. Al(111) kristal düzleminde  $2\theta$  açısının  $38^\circ$ 'deki pik şiddetleri; 0, 3, 9, 18 ve 39 saat yaşlandırılan beş farklı numunenin, pik şiddetlerindeki farklar elde edilmiş ve birleştirilmiş grafik ile gösterilmiştir. Yaşlandırma süresinin artmasına paralel olarak pik şiddetlerinde azalma meydana gelmiştir. Pik şiddetlerindeki bu azalma 18 saat yaşlanmaya kadar devam etmiştir. 18 saat yaşlandırmadan sonra pik şiddetleri tekrar yükselme göstermiştir. Al elementinin XRD difraksiyonundaki  $2\theta$  açıları başlıca  $38^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $78^\circ$  ve  $81^\circ$  açılarında pik vermiştir.

XRD grafiklerindeki pik şiddetlerinin, FWHM (pik yarı yüksekliğindeki tam genişlik) değerleri grafiklerle gösterilmiştir. Bu numunelerin XRD grafiğindeki FWHM değerleri de yaşlanma süresinin artmasıyla azalma göstermiştir. Bu azalma 18 saat yaşlandırmaya kadar devam etmiş, 18 saat yaşlanmadan sonra tekrar yükselme göstermiştir. Bu çalışmada XRD grafiklerindeki, pik şiddetleri ve yaşlanma süresine bağlı FWHM değerleri grafik olarak gösterilmiştir. XRD grafiklerinde  $2\theta$  açısında, element ve bileşiklerin pikleri de görülmektedir. Al-Cu alaşımı içerisinde bulunan intermetalik bileşiklerin XRD analizi grafiklerinde,  $2\theta$  açılarında belirli kristal düzlemlerinde pik verdikleri görülmektedir.

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımında Al elementinin Al(111), Al(200), Al(311) ve Al(222) kristal düzlemlerinde difraksiyon yansıması verdiği görülmektedir. Bakır elementi Cu(200), Cu(220) kristal düzlemlerinde difraksiyona uğramıştır. Al-Cu alaşımında bulunan Cu elementi;  $\theta$ - $Al_2Cu$  intermetalik bileşiği halinde alaşım içerisinde bulunmaktadır.  $\theta$ - $Al_2Cu$  intermetalik bileşiği,  $20^\circ$  ve  $48^\circ$ 'deki  $2\theta$  açılarında,  $Al_2Cu(100)$  kristal düzlemlerinde kırınım yapmıştır.

AlSr10 aşılama girilen Al-Cu alaşımlarının XRD analizlerinde Al elementi Al(111) kristal düzleminde,  $38^\circ$ 'deki  $2\theta$  açısında pik vermiştir. Yaşlandırma sürecinin artmasıyla pik şiddetinde azalma meydana gelmiştir. Pik şiddetindeki bu azalma 18 saat yaşlandırmaya kadar devam etmiş, 18 saat yaşlandırmadan sonra tekrar yükselme göstermiştir. AlSr10 aşılama girilen Al-Cu alaşımlarının XRD analizlerinde; Al

elementi,  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu bileşiği, AlSr ve Al<sub>4</sub>Sr intermetalik bileşikleri, tane inceltme işleminde çekirdekçik alt tabakası olarak bulunup,  $\alpha$ -Al çekirdeklerinin bunlar üzerinde teşekkül ederek büyüme gösterdikleri anlaşılmaktadır. AlSr bileşiğinin yüzde oranı, Al<sub>4</sub>Sr intermetalik bileşiğinin oranına göre yaklaşık iki kat olduğu görülmektedir.

Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılamaçılarının girilmiş olduğu Al-Cu alaşımlarının XRD grafiklerinde,  $2\theta$  açısında,  $\alpha$ -Al matrisin ve intermetalik bileşiklerinin difraksiyon kırınım pikleri görülmektedir. Bu her iki alaşımın bileşiminde,  $\alpha$ -Al matrisi yanında Cu, Fe, Si, Mn ve Mg elementlerinin bulunduğu SEM analizlerinde görülmektedir. XRD analizlerinde,  $\alpha$ -Al matrisiyle beraber kararlı TiB<sub>2</sub> ile AlB<sub>2</sub> bileşikleri ve kararsız Al<sub>3</sub>Ti intermetalik bileşiklerinin pikleri XRD grafiklerinde görülmektedir. Ayrıca bu intermetalik bileşiklerin seçilen bölgedeki ağırlıkça ve atomik yüzde oranları da verilmiştir.

Daha önceki literatür çalışmalarının da gösterdiğine göre Al-Cu alaşımlarında tane boyutunu belirleyen iki mekanizma vardır. Bunlar; heterojen çekirdeklenme ve akabinde tane büyümesidir. Heterojen çekirdeklenme mekanizmasında  $\alpha$ -Al tanelerinin çekirdeklenmesi için ergimiş sıvı, metal içerisinde çekirdeklenmenin başlayacağı alt tabaka olması gerekmektedir. Sıvı eriyik içerisinde Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılamaçılarını girildiğinde çok sayıda küçük boyutlu partiküller halinde; TiB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> intermetalik parçacıklar sıvı alaşım içerisinde dağılmakta ve bunlar çekirdeklenme için alt tabaka görevi görmektedir. TiB<sub>2</sub> ve AlB<sub>2</sub>'nin sıvı alüminyum içerisinde 750°C de kararlı olduğu ve ergimeden kaldığı bilinmektedir. Al<sub>3</sub>Ti ise 750°C de kararsız olup erimektedir. Çözünen Al<sub>3</sub>Ti bileşiğindeki Ti elementi,  $\alpha$ -Al çekirdekçiklerinin büyüme mekanizmasına katkıda bulunmaktadır. Tane yapısının boyutunu, bu çekirdekçiklerin sıvı içindeki oranı ve bunların büyüme mekanizması belirlemektedir.

Bu çalışmada Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılamaçılarını girilen alaşımlarda 18 saat yaşlandırma sonunda elde edilen ortalama tane boyutu değerlerine bağlı olarak, Al-Cu alaşımlarının içerisinde bulunan TiB<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> intermetalik bileşikleri ve bunların seçilen bölgelerdeki ağırlıkça yüzde oranları gösterilmiştir.

AlSr<sub>10</sub> alaşımı Al-Si alaşımlarında modifiye edici eleman olarak yaygın olarak kullanılmakla birlikte, bu çalışmada AlSr<sub>10</sub> tane inceltici mastır alaşımı, Al-%5Cu alaşımlarında aşılamaçısı olarak kullanılmış ve tane inceltmede etkin sonuç alınmıştır. AlSr<sub>10</sub> tane inceltici mastır alaşımının, Al-%5Cu alaşımına aşılamaçısı olarak %0,6 oranında girilmesiyle, sıvı metalde eriyerek Al<sub>4</sub>Sr ve AlSr bileşikleri ortaya çıkar ve bu bileşikler sıvı metal içinde dağılırlar. Al<sub>4</sub>Sr ve AlSr bileşikleri, Al-%5Cu alaşımının

heterojen çekirdeklenme aşamasında alt tabaka görevi görerek tane inceltmeye katkı sağlamışlardır. Bu çalışmada aşıl原因ıcı girilmeyen Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu 175 µm'dir. Al-%5Cu alaşımına, AlSr10 aşıl原因ıcı girildiğinde %7'lik bir tane inceltme elde edilerek ortalama tane boyutu 163 µm olarak elde edilmiştir. Daha sonra Al-%5Cu alaşımına AlSr10 aşıl原因ıcı girilen alaşımın 175°C'de 18 saat yaşlandırılması sonucunda %48'lik bir tane boyutu inceltme verimi elde edilerek ortalama tane boyutu 92 µm olarak elde edilmiştir.

### 9.9. Aşınma Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B, Al5Ti1B gibi üç farklı tane inceltici girilerek, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 18 saat yaşlandırma uygulanan Al-Cu alaşımına Aşınma deneyleri uygulanmıştır.

Bu deneyde kullanılan numunelerin hepsi; 25°C oda sıcaklığında, 1m/s sabit hızda ve 3000 m sabit kayma mesafesinde aşınma deneyine tabi tutulmuşlardır. Dört farklı grup olan aşınma numunelerine 10 newton, 20 newton ve 40 newton olarak üç farklı yük uygulanmıştır.

Aşınma deneyi uygulanan dört farklı numune yüzeylerinden SEM görüntüleri elde edilmiştir. SEM analizleri sonucuna göre; aşınma deneyleri sonucunda, aşınma türlerinden **abrasiv aşınma**, **adhesiv aşınma** ve **yorulma aşınması** numune yüzeylerinde birlikte meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 8.42'deki grafiğe göre; en fazla aşınma 40 newton yük uygulanan aşıl原因ıcı girilmeyen Al-Cu alaşımında 0,0653 mg/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Aşıl原因ıcıların ilave edilmesiyle aşınma oranlarında azalma görülmüştür. Al-%5Cu alaşımına ilave edilen AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşıl原因ıcıları, aşınma oranını azaltmışlardır. Al-%5Cu alaşımında aşınmaya karşı etkili olan ve aşınma etkisini azaltan aşıl原因ıcılar sırasıyla, AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B tane inceltici mastır alaşımalarıdır.

175°C'de 18 saat yaşlandırılan, 40 newton yük uygulanan dört farklı grup alaşımlardan hazırlanan numunelere, 1m/s hızında, 3000 m sabit aşınma mesafesinde aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşıl原因ıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşıl原因ıcıları girilen Al-Cu alaşımının, aşınma deney sonuçları; (kütle kaybı/yüzey alanı olarak) büyükten küçüğe doğru sırasıyla; 0,0653mg/mm<sup>2</sup>, 0,0479mg/mm<sup>2</sup>, 0,0430mg/mm<sup>2</sup> ve 0,0351mg/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Aşıl原因ıcıların

Al-Cu alaşımına ilave edilmesiyle aşınma oranlarında belirgin bir azalma grlmştir. Bu  farklı alaşımların Al-Cu alaşımlarına ilave edilmesiyle elde edilen aşınma değerlerindeki azalma oranları, (AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılayıcıları için) sırasıyla; %26, %34 ve %46 oranlarında elde edilmiştir.

Bu çalışmada aşınmaya karşı en dayanıklı olan alaşım, Al5Ti1B ilave edilen Al-Cu alaşımı olarak bulunmuştur. 40 newton yk uygulanan, AlSr10 aşılayıcı girilen Al-Cu alaşımı, aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımına göre %26 oranında daha dirençlidir. 40 newton yk uygulanan aşınma deneyinde, Al3Ti1B aşılayıcı girilen Al-Cu alaşımı, aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımına göre %34 oranında daha dayanımlıdır. 40 newton yk uygulanan ve Al5Ti1B ilave edilen Al-Cu alaşımının aşınma dayanımı, aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımına göre %46 oranında daha dirençli olduğu grlmştir.

Al5Ti1B ilave edilen Al-Cu alaşımının uygulanan yüklere göre aşınma oranları ise şöyledir. Al5Ti1B ilave edilen Al-Cu alaşımına 20 newton yük uygulandığında, 10 newton yk uygulanan alaşıma göre %18 daha fazla aşınma grlmştir. Bu alaşım numunesine 40 newton yük uygulandığında ise 10 newton yk uygulanan alaşıma göre %97 daha fazla aşınma meydana gelmiştir.

Yük oranının artmasıyla beklenildiği gibi aşınma miktarı da doğru orantılı olarak artma göstermektedir. En az aşınma ise 10 newton yk uygulanan Al5Ti1B aşılayıcı girilen Al-Cu alaşımında 0,0178 mg/mm<sup>2</sup> mg olarak elde edilmiştir.

Al-%5Cu alaşımlarında aşınmaya karşı etkili olan ve aşınma etkisini azaltan aşılayıcılar sırasıyla, AlSr10 (%26), Al3Ti1B (%34) ve Al5Ti1B (%46) tane inceltici mastır alaşımlarıdır.

## 9.10 Daldırmalı Korozyon Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılayıcıları girilen Al-Cu alaşımlarına, 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme, 175°C'de 18 saat yaşlandırma uygulandıktan sonra, bu numunelere 25°C oda sıcaklığında 590 saat **Daldırmalı Korozyon** uygulanmıştır. Hazırlanan bu numuneler, 300 g distile su, %3,5 NaCl ve %1 HCl (%37'lik konsantrasyonda) tuzlu su ve asidik ortamda daldırmalı korozyona maruz bırakılmışlardır. Al-Cu alaşımlarının birim yüzey alanlarında korozyondan sonra meydana gelen kütle kayıpları mg/mm<sup>2</sup> cinsinden llmştir.

Buna göre; tane inceltici girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşılanan dört grup Al-Cu alaşımlarından hazırlanan numunelerin yüzeylerinde, 25°C'de 590 saat için, daldırmalı korozyondan dolayı meydana gelen kütle kayıpları ölçülmüştür. Numunelerin birim yüzeylerindeki kütle kayıpları; AlSr10 ile aşılanan Al-Cu alaşımı, aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılayıcıları ile aşılanan Al-Cu alaşımları için küçükten byge doğru sırasıyla; 0,5437 mg/mm<sup>2</sup>, 0,5808 mg/mm<sup>2</sup>, 0,6832 mg/mm<sup>2</sup> ve 0,7395 mg/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

25°C'de 590 saat daldırmalı korozyona maruz bırakılan bu dört grup Al-Cu alaşım numunelerindeki kütle kayıp oranlarını küçükten byge doğru sıraladığımızda; AlSr10 ilave edilen Al-Cu alaşımı, aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı, Al3Ti1B girilen Al-Cu alaşımı ve Al5Ti1B ilave edilen Al-Cu alaşım numunelerindeki kütle kaybı oranları; %6, %25 ve %36 oranlarında daha fazla olduğu görülmüştür. Daldırmalı korozyondan en az etkilenen alaşım, AlSr10 ile aşılanan Al-Cu alaşımıdır.

Aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımının, AlSr10 ile aşılanan alüminyum bakır alaşımından daha çok korozyona uğradığı görülmüştür. Al3Ti1B ve Al5Ti1B ile aşılanan alaşımlar, AlSr10 ile aşılanan Al-Cu alaşımlarından daha fazla daldırmalı korozyona uğradıkları görülmektedir. Bu alışmada Sr elementi ile aşılanan Al-Cu alaşımlarının, Ti ve B elementleri ile aşılanan Al-Cu alaşımlarına göre daldırmalı korozyona karşı daha dirençli olduğu görülmüştür.

### **9.10.1 Korozyon SEM İnceleme Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Bu alışmada 175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan aşılayıcı girilmeyen Al-Cu alaşımı ile AlSr10, Al3Ti1B ve Al5Ti1B aşılayıcıları eklenen Al-Cu alaşımlarına, 25°C'de tuzlu su ve asidik ortamda 590 saat daldırmalı korozyon uygulanmış ve bu dört farklı Al-Cu alaşımı farklı derecelerde korozyon ortamından etkilenmişlerdir. Numunelerin yüzeylerinde korozyon sebebiyle kütle kayıpları meydana gelmiştir. Korozyon süresinin artmasıyla doğru orantılı olarak kütle kayıpları artmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının safiyet derecesi azaldıkça korozyona karşı mukavemet değerleri düşer. Alüminyum alaşımlarına katılan alaşım elementleri korozyon direncini azaltmaktadır. Alüminyum alaşımlarının kristal yapısı ne kadar saf ise korozyon dayanımı o kadar iyi olur. Bu çalışmada alüminyum alaşımlarının yaşlandırılması sonucunda oluşan intermetalik fazların, alaşımın korozyon direncini azalttığı görülmüştür. Malzemenin kristal yapısında bulunan fazlar birbirlerine sıkı bir şekilde,

bağ enerjisi ile bağlı değilse kristal yapıdaki atomlar daha kolay çözünme göstererek korozyonun ilerlemesi sonucunu doğururlar.

Galvanik korozyon iki metalin potansiyel farklarından dolayı, elektron ilgisi daha yüksek olan metalin, yani katodun temas halinde olduğu diğer metalden elektron koparıp indirgenmesi, elektron ilgisi daha düşük olan metalin ise elektronlarını kaybedip oksitlenmesi ve zamanla tükenmesi yani korozyon olması mekanizmasıdır. Galvanik korozyon iki farklı metalin bağlantısından ileri gelen bir korozyon çeşididir. Aynı ortamda bulunan farklı metaller arasında bu tip korozyona çokça rastlanır.

Galvanik korozyonun gerçekleşmesi için şu dört unsurun mutlaka bir arada bulunması gerekir. Bunlar; anot, katot, elektrolit ve elektron iletim ortamıdır. Metal iyonlarının oksidasyonu ile oluşan elektronlar metal iletken ortamı sayesinde katoda transfer olur. Böylece indirgenme reaksiyonu gerçekleşir ve galvanik korozyon meydana gelir. Bu çalışmada daldırılmalı korozyon deneyinde başlıca Al ve Cu olmak üzere alaşımda bulunan diğer elementler birbirleriyle eşleşerek farklı elektron potansiyeli oluşturarak galvanik korozyon meydana gelmiştir.

Çukurcuk korozyonu bölgesel bir korozyon türüdür ve genellikle alüminyum gibi yüzeyinde koruyucu bir tabakaya sahip malzemelerde görülür. Ortamda bulunan iyonlar veya yüzeydeki tabakada meydana gelen her hangi bir hasar, bu bölgenin daha anodik olmasına ve çevresiyle galvanik ikili oluşturmaya sebep olur. Neticede korozyon malzemenin iç kısımlarına doğru ilerler. Çukurcuk korozyonunu asidik ortamlardaki saldırgan iyonlar tetikler. Böylece yüzey tabakasının kararlı olduğu potansiyel değerlerinde korozyon meydana gelir. Aynı şekilde aktif-pasif geçiş bölgelerinde oksit tabakası zarar görürse bölgesel çukur korozyonu meydana gelebilir. Alüminyum ve alaşımlarında en çok rastlanan korozyon tipi çukur korozyonudur ve son derece tehlikeli sonuçlara neden olabilmektedir.

Bu çalışmada korozyonun meydana geldiği ortam, %3,5 tuzlu su ve %1 HCl asidik ortam olduğundan dolayı **galvanik korozyon** ve **çukurcuk korozyonu** meydana gelmiştir. Şekil 8.53 – 8.57 arasındaki şekillerde şiddetli bir şekilde galvanik korozyon ve çukurcuk korozyonuna uğramış numunelerin SEM görüntüleri görülmektedir.

### 9.10.2 Korozyon Yüzeyaltı (Subsurface) inceleme sonuçlarının değerlendirilmesi

175°C sıcaklıkta 18 saat yaşlandırılan ve 25°C’de 590 saat daldırmalı korozyona maruz bırakılan 4 farklı Al-Cu alaşımlarının korozyon davranışını belirlemek amacıyla bu numuneler yüzeyaltı (subsurface) inceleme işlemine tabi tutulmuştur.

Korozyona uğrayan silindirik yüzeylerin keskin kenar bölgeleri optik mikroskop altında incelenerek farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. Deney sonucunda elde edilen yüzeyaltı (subsurface) mikro yapı görüntülerinde; galvanik korozyon, çukurcuk korozyonu ve tane sınırı korozyon çeşitlerinin meydana geldiği görülmektedir.



## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 10.1 Sonuçlar

Bu çalışmada Ti elementinin tane inceltme etkisinin B ve Sr elementlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Al-%5Cu alaşımlarına tane inceltici olarak girilen Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılamaçısının tane boyutu inceltme etkisi, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve AlSr<sub>10</sub> aşılamaçılarına göre daha yüksektir.

Bu çalışmada AlSr<sub>10</sub>, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B gibi üç farklı aşılamaçılarının Al-%5Cu alaşımlarına ilave edilmesiyle, Al-%5Cu alaşımının tane boyutunu inceltme etkileri ortaya çıkmıştır. Al-%5Cu alaşımına ilave edilen aşılamaçılarının tane boyutu inceltme etkileri sırasıyla; AlSr<sub>10</sub> aşılamaçısı için ortalama tane boyutu 163 µm, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılamaçısı için ortalama tane boyutu 91 µm ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılamaçısı için ortalama tane boyutu 51 µm olarak elde edilmiştir. Al-%5Cu alaşımına ilave edilen bu aşılamaçılarının, 175°C'de 18 saat yaşlandırılmasıyla elde edilen en küçük ortalama tane boyutu değerleri sırasıyla; AlSr<sub>10</sub> aşılamaçısı için ortalama tane boyutu 76 µm, Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılamaçısı için ortalama tane boyutu 53 µm ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılamaçısı için ortalama tane boyutu 38 µm olarak elde edilmiştir.

Tane inceltmede aşılamaçısı elementlerin etkileri sırasıyla Sr, B ve Ti olarak elde edilmiştir. Üç farklı aşılamaçılardan tane boyutu inceltmede en etkili olan Al-5Ti-1B tane inceltici mastır alaşımıdır.

Bu çalışmada, %0,6 oranında Al-5Ti-1B tane inceltici mastır alaşımının Al-%5Cu alüminyum bakır alaşımına girilmesiyle, çekme dayanımında 417 MPa, akma dayanımında 271 MPa ve % uzamada 5.30, Brinell sertlik değeri 112 HB gibi en yüksek değerli mekanik özellikler elde edilmiştir. Ayrıca Al-5Ti-1B aşılamaçısının Al-%5Cu alaşımına girilmesiyle 175°C'de 3 saat yaşlandırma sonucu en yüksek V-Charpy çentik darbe dayanımı 20,17joule olarak elde edilmiştir.

Al-%5Cu alüminyum bakır alaşımının çekme dayanımı, akma dayanımı gibi mekanik özellikleri, tane inceltici girilerek ve T6 yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanarak artırılmıştır.

Çekme dayanımı özelliğindeki bu artış oranı, AlSr<sub>10</sub> tane incelticisi ile %25 oranında (253 MPa) ve 18 saat yaşlandırma ısıl işlemiyle %19 oranında (303 MPa) artırılmıştır.



Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B tane incelticisi girilerek çekme dayanımı %34 oranında (271 MPa) ve 18 saat yaşlandırma ısıl işlemlerle %24 (336 MPa) oranında bir ilave artış sağlanmıştır.

Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B tane incelticisi ilave edilerek çekme dayanımında %41 (285 MPa) oranında ve 18 saat yaşlandırma ısıl işlemlerle %35 (386 MPa) oranında bir ilave artış elde edilmiştir.

Aşıl原因ıcıların ve Yaşlandırmanın Çekme gerilmesini (R<sub>m</sub>) artırma oranları

Tane incelticiler	Aşıl原因ıcıların Etkisi		18 Saat Yaşlandırma Etkisi	
	(%)	R <sub>m</sub> (MPa)	(%)	R <sub>m</sub> (MPa)
Al-%5Cu	00	201	%38	278
AlSr10	%25	253	%19	303
Al <sub>3</sub> Ti <sub>1</sub> B	%34	271	%24	336
Al <sub>5</sub> Ti <sub>1</sub> B	%41	285	%35	386

AlSr10 tane inceltici mastır alaşımı Al-%5Cu alüminyum bakır alaşımının tane boyutunu inceltmede etkilidir, ancak Al-Ti-B tane incelticilerden daha az etkilidir.

AlSr10 alaşımı Al-Si alaşımında modifiye edici eleman olarak yaygın olarak kullanılmakla birlikte, bu çalışmada AlSr10 tane inceltici mastır alaşımı, Al-%5Cu alaşımında aşıl原因ıcı olarak kullanılmış ve tane inceltmede etkin sonuç alınmıştır.

AlSr10 tane inceltici mastır alaşımının, Al-%5Cu alaşımına aşıl原因ıcı olarak %0,6 oranında girilmesiyle, sıvı metalde eriyerek Al<sub>4</sub>Sr ve AlSr bileşikleri ortaya çıkmakta ve bu bileşikler sıvı metal içinde dağılılarak Al-%5Cu alaşımının heterojen çekirdeklenme aşamasında alt tabaka görevi görerek tane inceltmeye katkı sağlamaktadırlar.

Bu çalışmada aşıl原因ıcı girilmeyen Al-%5Cu alaşımının ortalama tane boyutu 175 µm'dir. Al-%5Cu alaşımına, AlSr10 aşıl原因ıcı girildiğinde %7'lik bir tane inceltme elde edilerek ortalama tane boyutu 163 µm olarak elde edilmiştir. Daha sonra Al-%5Cu alaşımına AlSr10 aşıl原因ıcı girilen alaşımın 175<sup>0</sup>C'de 18 saat yaşlandırılması sonucunda %48'lik bir tane boyutu inceltme verimi elde edilerek ortalama tane boyutu 76 µm olarak elde edilmiştir.

Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B ve Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşıl原因ıcılarının, Al-%5Cu alaşımına %0,6 oranlarında girilmesiyle bu aşıl原因ıcılar ergimiş sıvı metal içerisinde eriyerek, Al<sub>3</sub>Ti, AlB<sub>2</sub> ve TiB<sub>2</sub>

bileşikleri teşekkül ederler. Ergimiş sıvı metal içerisinde dağılan bu bileşikler, Al-%5Cu alaşımının heterojen çekirdeklenmesinde alt tabaka görevi görürler.

Bu çalışmada Al-%5Cu alaşımına Al<sub>3</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılama ilave edildiğinde %48'lik tane inceltme verimi elde edilerek ortalama tane boyutu 91 µm olarak elde edilmiştir. Bu alaşımın 175°C'de 18 saat yaşlandırılması sonucunda %70'lik bir tane boyutu inceltme verimi elde edilerek ortalama tane boyutu 53 µm olarak elde edilmiştir. Al-%5Cu alaşımına Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılama ilave edildiğinde %71'lik tane inceltme verimi elde edilerek ortalama tane boyutu 51 µm olarak elde edilmiştir. Bu alaşımın 175°C'de 18 saat yaşlandırılması sonucunda %79'luk bir tane boyutu inceltme verimi elde edilerek ortalama tane boyutu 38 µm olarak elde edilmiştir.

Al-3Ti-1B ve Al-5Ti-1B tane incelticileri birbirleriyle karşılaştırıldığında, Al-5Ti-1B aşılama ilave edilen Al-%5Cu alaşımı, Al-3Ti-1B aşılama ilave edilen Al-Cu alaşımına oranla çekme dayanımı özelliğinde %14 oranında artış göstermiştir. Mekanik özelliklerdeki bu artış titanyum elementinin tane inceltmede daha etkili olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada optimum T6 ısıl işlem parametreleri; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve takibinde 175°C'de 18 saat yapay yaşlandırma süresi olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada 175°C'de 18 saat yaşlandırılan Al-%5Cu alaşımında, abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve yorulma aşınması olmak üzere üç farklı aşınma mekanizmasının birlikte etkin oldukları görülmüştür. Bu çalışmada Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B aşılama ilave edilen Al-%5Cu alaşımının aşınmaya karşı en fazla direnç gösteren malzeme olduğu ortaya çıkmıştır.

Al-%5Cu alaşımaları tuzlu su ve asidik ortamlarda daldırılmalı korozyona karşı dirençli değildirler. 590 saat daldırılmalı korozyon sonucunda numunelerin yüzeylerinin tahrip olduğu görülmüştür.

AlSr<sub>10</sub> tane inceltici ile aşılama Al-%5Cu alaşımının, deniz suyu gibi tuzlu ortamlar için korozyon direnci Ti ve B elementleriyle aşılama alaşımlardan daha yüksek olduğu bu çalışma sonucunda elde edilmiştir.

## 10.2. Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre optimum T6 ısıl işlem parametreleri; 535°C'de 4 saat çözeltiye alma, 25°C'de suda su verme ve takibinde 175°C'de 18 saat yapay yaşlandırma süresi olarak elde edilmiştir.

Tuzlu su ortamlarında kullanılacak deniz taşıtlarında AlSr10 ile aşılana Al-%5Cu alüminyum bakır alaşımları kullanılırsa korozyona karşı daha yüksek dirençli bir malzeme tercih edilmiş olur.

Aşınmaya karşı yüksek direnç istenen durumlar için, Al-%5Cu alaşımına Al5Ti1B aşılama girilerek elde edilen alaşımların kullanılması önerilir.



**KAYNAKLAR**

- Ada Nokta Metal, 2019, [online], [http://adanoktametal.com/tr/h/sanayide aluminyum imalatinin gelismisi nasildir](http://adanoktametal.com/tr/h/sanayide_aluminyum_imalatinin_gelisimi_nasildir), [Erişim Tarihi: 05.12.2019]. Anonim.
- Akadya Geri Kazanım, 2019, Endüstri Makine San. Tic. Ltd. Şti., Teknik Bilgiler Portalı, [online], [http://akadyagerikazanim.com/teknik bilgiler](http://akadyagerikazanim.com/teknik_bilgiler), [Erişim Tarihi: 05.02.2019]. Anonim.
- Alp, E., 2014, Farklı Ortamlarda Alüminyum Korozyonuna Saponin Türevinin İnhibitör Etkisi, *Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı*.
- 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, 2017, DOI: 10.21923/jesd.287005
- Alüminyum ve Alaşımlarda Isıl İşlemler, 2020, [online], <https://www.frmtr.com/fizik-kimya/888716-aluminyum-ve-alasimlarda-isil-islemler.html>, [Erişim Tarihi: 15.01.2020]. Anonim.
- Ansiklopedi, 2019, <https://www.ansiklopedi.com/cwiki/wiki>, [online], [Erişim Tarihi: 11.01.2020].
- Arslan, Y. B., 2020, Malzeme Bilimi, Teknik Kütüphane, [online], <https://malzemebilimi.net/aluminyum-alasimlari.html>, [ Ziyaret Tarihi: 21.01.2020 ].
- Backerud, L., Johnsson, M., ve Sigworth, G. K. (1993). Study of The Mechanisms of Grain Refinement of Aluminum After Additions of Ti and B Containing Master Alloys. *Metallurgical Transactions A(physical metallurgy and material science)*, 24A, 2, 481-491.
- Başer, T. A., 2012, Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, *Mühendis ve Makina, cilt 53, sayı 635, s. 51-58*
- Binczewski, G.J., 1995, The Point of a Monument: A History of the Aluminum Cap of the Washington Monument. *JOM*, 47 (11) 1995, pp. 20–25
- Birru, A. K., Karunakar, D. B. and Mahapatra M. M., 2012, A Study on Hot Tearing Susceptibility of Al-%5Cu, Al-Mg and Al-Zn Alloys, *Trans Indian Inst. Met.*, 65(1):97-105
- Bo, L., ve ark., 2019, “Developing high performance squeeze cast Al-Cu alloys with high Fe and Cu contents.” *International Journal of Cast Metals Research*, Volume 32, pages 106-113, 2019 - Issue 2
- Brown, J. R., 1999, *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, 11. Baskı Butterworth - Heinemann, Oxford, 70-77.
- Bunn, A. M., Schumacher, P., Kearns, M. A., Boothroyd, C. B. and Greer, A. L., 1999, Grain Refinement by Al-Ti-B Alloys in Aluminium Melts: A Study of the Mechanisms of Poisoning by Zirconium, *Materials Science and Technology*, October 1999 Vol. 15, page 1115-1123
- Cavazos, J. L. and Cola's R., 2001, Precipitation in a Heat-Treatable Aluminum Alloy Cooled at Different Rates, *Materials Characterization*, V. 47, 17-179.
- Ceschini, L., ve ark., 2009, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 5669-5679.
- Chen, L.Y., Xu, J.Q. ve Li, X.C., 2015, Controlling Phase Growth During Solidification by Nanoparticles, *Materials Research Letters*, Vol. 3, No.1, 43-49
- Chong P.H., Liu Z., Skeldon P, ve Thompson G.E., 2003, Corrosion Behavior of Laser Surface Melted 2014 Aluminium Alloy In T6 and T451 Tempers, *The Journal Of Corrosion Science And Engineering*, 6, 12.
- Cibula, A., 1949, *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 76, pp. 321-360.

- Cibula, A., 1951, *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 80, pp. 1-16.
- Craig D.B., ve Anderson D.S., 1995, Handbook of Corrosion Data, A.S.M International, 16-18.
- Crossley F.A., ve Mondolfo L.F., 1951, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, vol. 191, pp. 1143-1148.
- Çağatay, A. ve Arman, B., 1982, Boksit ve Türkiye'deki Boksit Cevherleri, *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, Ankara, Jeoloji Mühendisliği*.
- Çatal, S. ve Erbil, M., 2010, Alüminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakasının Fosforik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi, *Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010, Yüksek Lisans Tezi, Cilt:22-1 64*
- Çatar, R. ve ark., 2017, Cu İlavesinin Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *Technological Applied Sciences, Cilt 12, Sayı 2, s. 65-72*
- Çolak, M. ve ark., 2009, Alüminyum Dökümlerde Tane İnceltme, *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 13. Cilt, 1. Sayı, s. 11-17*
- Çolak, M., ve ark., 2009, Al-Ti-B Mastır Alaşımı İlavesinin Etial-160 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane İnceltme Etkisinin İncelenmesi, *5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye*
- Darbe Deneyleri, 2019, [online], <https://cdn.bartın.edu.tr/makine/darbedeneyleri.pdf>, [Erişim Tarihi:27.09.2020]. Anonim.
- D'Elia, F., Ravindran, C. ve Sediako, D., 2012, Effects of Grain Refinement on Residual Strain and Hot Tearing in B206 Aluminum Alloy, *Advanced Materials Research Vol. 409 (2012), pp 35-40*
- De Ciccoa, M. P. ve Perepezko, J. H., 2013, Catalytic Effect of Nanoparticles on and Secondary Phase Nucleation, *Materials Science Forum Vol 765 (2013), pp 250-254*
- Demirci, A. H., 1988, Seçilen Bir Al-%5Cu Alaşımında (%4.5Cu) Yaşlandırma İşleminin Mekanik Özellik Değişimlerine Etkisi, *3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, s. 633-639*.
- Demircioğlu, P., 2002, Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Gaz Oluşumu ve Gaz Giderme Teknikleri, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 58-75 (2002)*.
- Ders Notları, 2016, Metalik Malzemelerin Çekme Deneyi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Mühendislikte Deneysel Metotlar Dersi*.
- Djurdjevic, M., Stockwell, T. ve Sokolowski, J., 1999, The Effect of Strontium on the Microstructure of the Aluminium-Silicon and Aluminium-Copper Eutectics in the 319 Aluminium Alloy. *Int. J. Cast Metal. Res. 1999;12 67-73*.
- Dong, X., ve ark., 2017, Enhancement of mechanical properties in high silicon gravity cast AlSi9Mg alloy refined by Al3Ti3B master alloy, *Materials Science and Engineering A 700 (2017) 291-300*
- Doruk, M., 1982, "Korozyon ve Önlenmesi", *ODTÜ Mühendislik Fakültesi Yayını, Ankara, 70*.
- Dündar, M., ve Güngör. G., 2002, Otomotiv Sektöründe Alüminyum Uygulamaları ve Sürekli Döküm Tekniği ile Üretilmiş Alüminyum Levha Alaşımları, [online], <http://www.assan.com.tr/DC/Image/P3.pdf> [Ziyaret Tarihi: Kasım 2012].
- Easton, M.A., 2016, Recent advances in grain refinement of light metals and alloys, *Current Opinion in Solid State and Materials Science 20 (2016) 13-24*
- Enerji Portalı, 2019, [online], [http://enerjiportali.com/aluminyum\\_nedir\\_nerede\\_kullanilir](http://enerjiportali.com/aluminyum_nedir_nerede_kullanilir), [Erişim Tarihi: 05.12.2019]. Anonim.

- Fan, Z., Wang, T., Zhang, Y., Qin, T., Zhou, X. R., Thompson, G. E., Pennycook T. and Hashimoto, T., 2015, Grain Refining Mechanism in the Al/Al-Ti-B System, *Acta Materialia* 84, 292-304
- Gan, Y., Li, L., Zhang, D., Zhang, W. and Li Y., 2013, Research on Characteristics of Heat Treatment of Squeeze Cast Al-%5Cu-Mg Alloy, *Materials Science Forum Vol 749 (2013)*, pp54-60
- Geçkinli, A. E., 2002, Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi, 2. *Isıl İşlem Sempozyumu CD'si*, 07-08 Şubat, Maçka-İstanbul.
- Glasson, E. L., ve Emley, E. F., 1968, The Solidification of Metals, 1-9, London, *The Iron and Steel Institute*.
- Guzowski, M.M., Sigworth, G.K. ve Senter, D.A., 1987, The Role of Boron in the Grain Refinement of Aluminium with Titanium, *Metal Transactions*, 18A, 603-19.
- Güler, K. A., 2003, Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi, *Bitirme Tezi*,
- Gündüz, M., 2012, İkili Al Esaslı Alaşımların Katı-Sıvı Ara yüzey Enerjisi ve Isıl İletkenliğinin İncelenmesi, *Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi*.
- Gündüz, S., 2012, □Metalurjide Faz Diyagramları, *Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş, Ankara*, 84-89 (2012).
- Haghdadi, N., Phillion, A. B. and Maijer, D. M., 2015, Microstructure Characterisation and Thermal Analysis of Aluminum Alloy B206 During Solidification, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2015*, doi: 10.1007/s11661-015-2780-0
- Hasırcı, H., 2015, Isıl İşlem Şartlarının Ötektik AlSi Döküm Alaşımının Abrasif Aşınma Davranışına Etkileri, *Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Teknikokullar, Ankara, Politeknik Dergisi, Cilt:18 Sayı: 1 s. 7-14, 2015*
- Hielscher Ultrason Teknolojisi, 2020, [online], [Erişim Tarihi:22.09.2020].  
<https://www.hielscher.com/tr/cavitation-erosion-testing.htm>, Anonim.
- Ibarra, D. G., 1999, Control of Grain Refinement of Al-Si Alloys by Thermal Analysis, Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University, Montreal Canada, 1-38.
- Jiehua, L., 2017, Heterogeneous nucleation of Al on AlB<sub>2</sub> in Al-7Si alloy, *Materials Characterization* 128 (2017) 7–13
- Jitao, Z., Mingfang, S., Zhenqing, W. ve Lidan, X., 2019, Effect of a New Grain Refiner (Al-Ti-Mg-Ce) on Hardness, Tensile, and Impact Properties of Al-7Si Alloy. *Metals* 2019, 9, 228; doi:10.3390/met9020228
- Jones, G. P., ve Pearson, J., 1976, Factors Affecting the Grain-Refinement of Aluminum Using Titanium and Boron Additives, *Metallurgical Transactions B*, 7: 223-234.
- Kara, F., 2019, Korozyon nedir? Korozyon türleri nelerdir? *MalzemeBilimi.Net*.
- Karabulut, A. ve Aran, A., 1984, AA2024 Alüminyum Alaşımında Soğutma Hızı Duyarlılığı, *II Ulusal Alüminyum Sanayi Kongresi, 10-12 Ekim, 1984, Seydişehir*, s. 363-370.
- Kashyap, K. T. ve Chandrashekar, T., 2001, Effects and Mechanisms of Grain Refinement in Aluminium Alloys. *Bull. Mater. Sci., Vol. 24, No. 4, August 2001*, pp. 345–353. *Indian Academy of Sciences*. 345
- Kato, K. ve Adachi, K., 2001, Wear Mechanism, *Modern Tribology Handbook*, 2001.
- Kavukçu, A., 2018, Malzeme Bilimi, [online], (<https://malzemebilimi.net/aluminyum-nasil-uretilir.html>), [Ziyaret Tarihi: 01.01.2020].

- Kayral, S., 2014, Isıl İşlem Görmüş 30MnB5 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin ve Çentik Darbe Geçiş Sıcaklığının İncelenmesi, *Celal Bayar Üniversitesi, E-Journal of New World Sciences Academy-Technological Applied Sciences*
- Kenneth, G. B. and Michael, G. B., 1999, Engineering Materials Properties and Selection, *Sixth edition, Prentice-hall.*
- Kocabağ, 1996, Metal ve Kaynak Teknolojileri, [online], <http://metaluzmani.com/malzeme-menu/aluminyum>, [Ziyaret Tarihi: 21.01.2020]
- Koşatepe, A., 2019, Tane İnceltisi İlavelerinin Al<sub>7</sub>Si<sub>0.3</sub>Mg Alaşımının Titreşimli Dökümüne Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, FBE, Metalürji ve Malzeme Anabilim Dalı.*
- Kvande, H., 1999. Environmental Improvements in Aluminum Production Technology, *Light Metal Age*, p.44.
- Lee, J. K. ve Kim, S. K., 2006, Microstructural Evolution of A206 Al Alloy by In-Ladle DTC Rheocasting, *Solid State Phenomena Vols. 116-117 (2006)*, pp 538-541
- Lee, J. K., Yoon, Y. O., Jo, H. H., Kim, Y. J. and Kim, S. K., 2006, Development of In-Ladle Direct Thermal Control (DTC) Rheo Casting Process, *Solid State Phenomena Vols. 116-117 (2006)*, pp 518-521
- Liu, K., Cao, X. ve Chen, X. G., 2014, Tensile Properties of Al-%5Cu 206 Cast Alloys with Various Iron Contents, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2014*, doi: 10.1007/s11661-014-2207-3
- Matsuda, K., Tada, S., ve Susuma, I., 1991, Aluminium Alloys, *Science and Engineering of Light Metals, Proc. Congress '91*, p. 899.
- Masuku, E. P., Möller, H., Knutsen, R., Ivanchev, L. and Govender, G., 2009, Optimisation of the Solution Heat Treatment of Rheo-Processed Al-%5Cu-Mg-(Ag) Alloys A206 and A201, *Materials Science Forum Vol s. 618-619*, pp 353-356
- Maxwell I., ve Hellawell A., 1975, *Acta Metallurgica.*, vol. 23, pp. 229-237.
- Meriç, C. 1989, Uçak Yapı Malzemeleri ve Al-Li Alaşımlarının Uçak Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği, 3. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, 29-31 Mart 1989.
- Metals HandBook, 1992, ASM International. ASM Metals HandBook Volume 02 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (2). 1992, p. 506-507
- Mohamed, A. M. A. ve Samuel, F. H., 2019, A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys, [online], <http://dx.doi.org/10.5772/79832> [Ziyaret Tarihi: 30.09.2019].
- Mohamed, A. M. A., Samuel, A. M., Samuel, F. H. ve Doty, H. W., 2009, Influence of Additives on the Microstructure and Tensile Properties of Near-Eutectic Al-10.8%Si Alloys. *Materials and Design 2009;30(10) 3943-3957.*
- Mohamed, A. M. A., Samuel, F. H. ve Alkahtani, S., 2012, Influence of Mg and Solution Heat Treatment on the Occurrence of Incipient Melting in Al-Si-Cu-Mg Cast Alloys. *Journal of Materials Science and Engineering A 2012; A543 22-34.*
- Mondolfo, L. F., 1983, Grain Refinement in the casting of Non Ferrous Alloys, Grain Refinement in Casting and Welds. *Metallurgical Society of AIME 3-5.*
- Murty, B. S., Kori, S. A., Chakraborty, M., 2002, Grain Refinement of Aluminium and its Alloys by Heterogeneous Nucleation and Alloying, *International Materials Reviews*, 47(1): 1-19.
- Mwamba, I. A., 2005, Characterisation of Al-Ti-B grain refiners prepared by

- aluminothermic reduction of TiO<sub>2</sub> and B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Yüksek lisans tezi, Witwatersrand Üniversitesi Mühendislik ve Çevre Fakültesi, Johannesburg, 29-30 (2005).*
- Nakashima, and Philip N. H., 2018, The Crystallography of Aluminum and Its Alloys, *in Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys ed. CRC Press, 16 Nov 2018), 488 – 586. George E. Totten,*
- Nümberger, U., 1995, “Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen”, *Band 1, Bauverlag GmbH, Wiesbaden un Berlin.*
- ODTÜ Kaynak Merkezi, 2011, Anonim.
- Özdemirler Metal, 2020, [online], <http://ozdemirlermetal.com.tr/aluminyum>, [Erişim Tarihi: 21.01.2020]. Anonim.
- Pasciak, K., ve Sigworth, G. K., "Role of Alloy Composition in Grain Refining of 319 Alloy", *AFS Trans*, 109: 567-577 (2001).
- Porter. D. A., ve Easterling, K. E., 1990, *Phase Transformations in Metals and Alloys*, Chapman and Hall, UK, 193-195.
- Sanders, R. E., Sanders, T. H. and Stalley, I. T., 1983, Relationship Between Microstructure, Conductivity and Mechanical Properties of Alloy 2024-T4 (1), *Aluminum*, 59, Jarg, 13-17.
- Sangchan, A., Plookphol, T., Wannasin, J. and Wisutmethangoon, S., 2014, Effect of Strontium on Microstructure and Mechanical Properties of Semi Solid A356 Al Alloy, *Advanced Materials Research Vol. 893 (2014), pp 353-356*
- Schneider, W. ve ark., 1998, A Comparison of AlTiB and AlTiC Grain Refinement, *The Minerals, Metals & Materials Society 2016. J. F. Grandfield and D. G. Eskin (Eds.), Essential Readings in Light Metals, Editor Barry Welch. page 400-401*
- Shivukmar, S., Ricci, S., Steenhoff, B. ve Sigwort, G., 1989, An Experimental Study to Optimize the Heat Treatment of A356 Alloy, 93rd AFS Casting Congressi. AFS Texas 7-11 S 13-14.
- Sigworth, G. K., 1984, The Grain Refining of Aluminum and Phase Relationships in the Al-Ti-B System, *Metallurgical Transactions A*, 15: 277-282.
- Sigwort, G. K. and Kuhn, T. A., 2007, Grain Refinement of Aluminum Casting Alloys, *American Foundry Society, Schaumburg, IL USA, Paper 07-067(02), Page 1-12*
- Sun, N. ve Apelian, D., 2009, Microstructural Modification of A206 Aluminium via Friction Stir Processing, *Materials Science Forum Vols. 618-619 (2009), pp 361-364*
- Sun, N. ve Apelian, D., 2011, Friction Stir Processing of Aluminum Cast Alloys for High Performance Applications, *Jom, November 2011, Vol.63, No. 11*
- Sun, N. ve Apelian, D., 2014, Composite Fabrication in Cast Al A206 via Friction Stir Processing, *International Journal of Cast Metals Research 2014, Metal Processing Institute, Advanced Casting Research Center, WPI, 100*
- Tahamtan, S., Halvae, A., Emamy, M., Jiang, Z. Y. ve Boostani, A. F., 2014, Exploiting Superior Tensile Properties of A Novel Network Structure Al A206 Matrix Composite by Hybridizing Micron-sized Al<sub>3</sub>Ti with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano Particulates, *Materials Science & Engineering A619 (2014), 190-198*
- Talamantes-Silva, M. A., Rodriguez, A., Talamantes-Silva, J., Valtierra, S. and Colas, R., 2008, Effect of Solidification Rate and Heat Treating on the Microstructure and Tensile Behavior of an Aluminum-Copper Alloy, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2008, doi: 10.1007/s11663-008-9204*
- Tayanç, M., Zeytin, G., 1998, Yaşlandırma Koşullarının 6063 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *TMMOB Metalurji Müh. Odası, 1. Isıl İşlem Sempozyumu, İ.T.Ü., Maslak-İstanbul, 63*
- Tekin, E., 1984, Demir dışı Metaller ve Alaşımlarının Uygulamalı Optik Metalografisi,



- II.Baskı, SEGEM Yayın No: 101, Ankara, 397*
- The Aluminium Association, AA, 1988.
- Tongmin, W., ve ark., 2012, A novel fading-resistant Al-3Ti-3B grain refiner for Al-Si alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 511 (2012) 45– 49
- Yılmaz, B., 2002, Alüminyum Alaşımlarında Faz Yapılarının Mekanik Özelliklere Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta. 23s.*
- Tetik, A., 2020, Alüminyum Korozyonu, [online], <https://www.academia.edu/alminyumkorozyonu/attachments/33214668/download> [Ziyaret Tarihi: 11.01.2020].
- Topbaş, M. A., 1993, Isıl İşlemler, *Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Türköz, M., 2009, Al2024 ve Al5754 Alaşımli Alüminyum Sacların Şekillendirilebilme Kabiliyetinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.*
- Uludağ, M., Yavaş, Z., Öztürk, Ü., Ülvan, N. S. ve Dışpınar, D., 2014, LM28 Alaşımında Tane İnceltme ve Sr Modifikasyonun Si Morfolojisine Etkisi, *Isites 2014 Karabük, Türkiye*
- Varol, T., 2016, Nano Partikül Takviyeli Bakır Esaslı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 2016.*
- Wanwu, D., Tiandong, X., Wenjun, Z. ve Yangtao, X., 2014, Effect of Al-5Ti-C Master Alloy on the Microstructure and Mechanical Properties of Hypereutectic Al-20 %Si Alloy. *Materials* 2014, 7, 1188-1200; doi:10.3390/ma7021188. [online], [www.mdpi.com/journal/material](http://www.mdpi.com/journal/material) [Ziyaret Tarihi: 29.09.2019].
- Wikipedia, 2019, (tr.wikipedia.org/wiki/Alüminyum), (Düzenleme tarihi:05.08.2019)
- Xie, M. Y., Ao, S. H. and Wang, X., 2014, Effect of Al5Ti1B Master Alloy on Microstructure and Mechanical Properties of Al-5wt.%Cu Based Alloy, *Advanced Materials Research Vol. 1051 (2014) pp. 195-198*
- Yeni Rehber Ansiklopedisi, 2019, s. 11, [online], <http://kainatingunesi.com/aluminyum>, [Erişim Tarihi: 05.12.2019]. Anonim.
- Yıldırım, G., 2020, Sincast, [online], <http://www.sincast.info/alasim-elementlerinin-aluminyuma-etkisi>, [Ziyaret Tarihi: 13.01.2020].
- Yurdakul, M. ve ark., 2002, Havacılık Alanında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Seçimi, *Gazi Üniversitesi. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 17, No 2, 2002.*
- Yücel, B., 2012, AlB3 master alloy to grain refine AlSi10Mg and AlSi12Cu aluminium foundry alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 513 (2012) 150– 153
- Zeren, M., 2012, Demir Dışı Düşük Sıcaklık Metal ve Alaşımları, s 11-20, 2012
- Zeytin, H. K., Arısoy, O. ve Teymur, B., 2001, Bazı Döküm Alüminyum Alaşımlarında Tane Yapısının Ortaya Çıkarılması, *MAMTEK 2001, Manisa, s. 11-20.*
- Zolotarevsky, V.S., Belov, N.A., ve Glazoff, M.V., 2007, Casting Aluminum Alloys, vol. I, UK, 2007.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Selman Çetintürk  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Sivrihisar (Eskişehir) - 1962  
**Telefon** : 0530 461 86 34  
**E-Posta** : selmanct@yahoo.com

### EĞİTİM

Derece	Adı	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Eskişehir Teknik Lisesi	Eskişehir	1980
Üniversite	: İTÜ Sakarya Üniversitesi	Sakarya	1986
Yüksek Lisans	: Yıldız Teknik Üniversitesi	İstanbul	1993
Doktora	: Konya Teknik Üniversitesi	Konya	2021

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum
2007-2013	: Soylu Döküm San. ve Tic. Ltd. Şti.
2013-2016	: Altın Döküm
2017	: 3D-Incerta Mühendislik Denetim Gözetim

### UZMANLIK ALANI

Alüminyum Dökümü

### YABANCI DİLLER

İngilizce (Orta seviye)  
Arapça (Orta seviye)