



T.C.  
Niğde Üniversitesi  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

Ag KATKILI Sn-ağ.% 8.8 Zn ÖTEKTİK ALAŞIMININ DOĞRUSAL  
KATILAŞTIRILMASI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

FATİH KARAKURT

Eylül 2015



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

Ag KATKILI Sn-ağ.% 8.8 Zn ÖTEKTİK ALAŞIMININ DOĞRUSAL  
KATILAŞTIRILMASI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

FATİH KARAKURT

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN

Eylül 2015

**Fatih KARAKURT** tarafından **Yrd. Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN** danışmanlığında hazırlanan “**Ag Katkılı Sn-ağ.% 8.8 Zn Ötektik Alaşımının Doğrusal Katılaştırılması ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

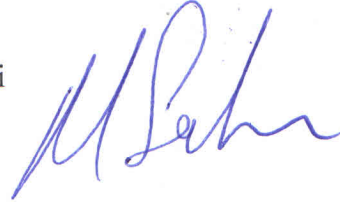
Başkan: Prof. Dr. Emin ÇADIRLI Niğde Üniversitesi



Üye: Doç. Dr. Uğur BÜYÜK Erciyes Üniversitesi



Üye: Yrd. Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN Niğde Üniversitesi



**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../....../2015 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ....../....../2015 tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

....../....../2015

**Doç. Dr. Murat BARUT**  
**MÜDÜR**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Fatih KARAKURT

## ÖZET

### Ag KATKILI Sn-ağ.% 8.8 Zn ÖTEKTİK ALAŞIMININ DOĞRUSAL KATILAŞTIRILMASI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

KARAKURT, Fatih  
Niğde Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN

Eylül 2015, 86 sayfa

Ag katkılı Sn-ağ.% 8.8 Zn ötektik alaşımları vakumlu eritme ve döküm fırınları kullanılarak hazırlandı. Daha sonra numuneler sabit sıcaklıkta, farklı katılaştırma hızlarında Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınında, yukarı yönlü katılaştırıldı. Katılaştırma hızının; mikrosertliğe, maksimum çekme gerilme dayanımına ve basma akma dayanımına etkisi araştırıldı. Alaşımların elektriksel özdirençleri standart dört nokta yöntemi ile ölçüldü ve özdirençin sıcaklık katsayıları hesaplandı. DSC analizleri yapılarak entalpi ve özısı değerleri belirlendi. Elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırıldı. Ayrıca Wiedemann-Franz bağıntısından hesaplanan termal iletkenlik katsayısı değerleri, deneysel elde edilen Sn-Zn alaşımlarına ait termal iletkenlik katsayısı değerleriyle karşılaştırıldı.

Anahtar sözcükler: Doğrusal katılaştırma, katılaştırma hızı, ötektik yapı, dendritik yapı, mikrosertlik, gerilme dayanımı, akma dayanımı, özdirenç, entalpi, özısı.

## SUMMARY

### THE DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF Ag ADDED Sn-8.8 wt.% Zn EUTECTIC ALLOY AND INVESTIGATION THE PHYSICAL PROPERTIES

KARAKURT, Fatih

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mevlüt ŞAHİN**

September 2015, 86 pages

Ag (0.0, 1.0, 3.0 wt.%) added Sn-8.8 wt.% Zn alloys have been prepared by using vacuum melting furnace and casting furnace. Then the samples have been directionally solidified upwards with a constant furnace temperature at different growth rates in a Bridgman type directional solidification furnace. The dependency of microhardness , maximum tensile strength and compressive yield strength on solidification rate were determined. The resistivities of the alloys were performed by the standard four-point probe method and the temperature coefficients of the resistivities were calculated. The enthalpy and the specific heat values were determined by the DSC analysis. The results were compared with the literature. Also, the thermal conductivity values obtained from Wiedemann-Franz equation were compared with the experimentally obtained thermal conductivities of the Sn-Zn alloys.

Keywords: Directional solidification, solidification rate, eutectic structure, dendritic structure, microhardness, tensile strength, yield strength, resistivity, enthalpy, specific heat.

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasını yaptıran ve çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mevlüt ŞAHİN'e saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım. Yine Yüksek Lisans çalışmalarım sırasında her türlü desteği sağlayan sayın Prof. Dr. Emin ÇADIRLI hocama teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca üzerimde emeği geçen tüm hocalarıma ve özellikle yaşamım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler ederim.



## İÇİNDEKİLER

|  |     |
|--|-----|
| ÖZET.....  | iv  |
| SUMMARY.....   | v   |
| ÖNSÖZ.....   | vi  |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....  | vii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....   | x   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....   | xi  |
| KISALTIMA VE SİMGELER.....   | xiv |
| BÖLÜM I GİRİŞ.....   | 1   |
| BÖLÜM II TEMEL KAVRAMLAR.....  | 3   |
| 2.1 Gibbs Serbest Enerjisi.....  | 3   |
| 2.2 Sıvı-Katı Faz Dönüşümlerinde yapısal Alt Soğuma.....                               | 5   |
| 2.3 Çekirdeklenme.....   | 8   |
| 2.3.1 Homojen çekirdeklenme.....   | 8   |
| 2.3.2 Heterojen çekirdeklenme.....   | 11  |
| 2.4 Alaşımlar ve Alaşımların Katılaştırılması.....                                     | 13  |
| 2.4.1 Tek fazlı alaşımların katılaştırılması.....                                      | 13  |
| 2.4.1.1 Dengesel katılaştırma.....   | 15  |
| 2.4.1.2 Katı içinde yayınmanın olmaması, sıvı içerisinde yayınmanın tam<br>olması..... | 16  |
| 2.5 Alaşımların Ötektik Katılaştırılması.....  | 19  |
| 2.5.1 İkili ve üçlü faz diagramları.....   | 20  |
| 2.6 Alaşımların Dendritik Katılaştırılması.....  | 22  |
| BÖLÜM III DENEYSEL SİSTEM VE BİR DENEYİN YAPILIŞI.....                                 | 24  |
| 3.1 Giriş.....   | 24  |
| 3.2 Deneysel Sistem.....   | 24  |
| 3.2.1 Vakumlu eritme fırını.....   | 24  |
| 3.2.2 Döküm fırını.....  | 27  |
| 3.2.3 Kontrollü katılaştırma fırını.....   | 29  |
| 3.2.3.1 Isıtıcı sistem.....  | 29  |
| 3.2.3.2 Soğutucu sistem.....   | 29  |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.3.3 Sürücü sistem.....  | 30 |
| 3.3 Bir Deneyin Yapılışı .....  | 32 |
| 3.3.1 Numune hazırlama .....  | 32 |
| 3.3.1.1 Alaşım hazırlama .....  | 32 |
| 3.3.1.2 Numune kalıbının ve potasının yapılması .....                                       | 32 |
| 3.3.1.3 Alaşımın üretilmesi ve dökümünün yapılması .....                                    | 35 |
| 3.3.2 Kontrollü katılaştırma .....  | 37 |
| 3.3.3 Metalografik işlemler.....  | 39 |
| 3.3.3.1 Numunelerin zımparalanması .....  | 40 |
| 3.3.3.2 Numunelerin parlatılması .....  | 41 |
| 3.3.3.3 Numunelerin dağlanması .....  | 42 |
| 3.3.4 Mikroyapılarının gözlenmesi .....   | 42 |
| 3.4 Mikrosertlik Ölçümü.....  | 43 |
| 3.5 En Çekme Gerilme Dayanımı Ölçümü .....  | 44 |
| 3.6 Basma Akma Dayanımı Ölçümü .....  | 46 |
| 3.7 Elektriksel Ölçümler .....  | 47 |
| 3.7.1 Özdirenç ölçümleri .....  | 47 |
| 3.7.2 Isıl iletkenlik hesabı .....  | 49 |
| 3.8 Entalpi ve Öz Isı Ölçümleri .....   | 49 |
| BÖLÜM IV DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....  | 51 |
| 4.1 Giriş .....   | 51 |
| 4.2 Görüntü Analizleri .....  | 51 |
| 4.3 Mikrosertlik Ölçümleri .....  | 55 |
| 4.3.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında mikrosertlik ölçümleri .....                                | 55 |
| 4.3.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında mikrosertlik ölçümleri.....                     | 56 |
| 4.3.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında mikrosertlik ölçümleri.....                     | 57 |
| 4.3.4 Deneysel sonuçların literatürle karşılaştırılması.....                                | 59 |
| 4.3.4.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması.....             | 59 |
| 4.3.4.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması..... | 60 |
| 4.3.4.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması..... | 61 |
| 4.4 En Yüksek Çekme Gerilme Dayanımlarının Ölçülmesi.....                                   | 61 |

|   |    |
|---|----|
| 4.4.1 Deneysel sonuçların literatürle karşılaştırılması.....                                | 62 |
| 4.4.1.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması.....             | 62 |
| 4.4.1.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ% 1.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması.....  | 63 |
| 4.4.1.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması..... | 64 |
| 4.5 Basma Akma Dayanımlarının Ölçülmesi .....   | 64 |
| 4.6 Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi.....   | 65 |
| 4.6.1 Elektriksel özdirençlerin ölçümü .....  | 65 |
| 4.6.2 Deneysel sonuçların literatürle karşılaştırılması.....                                | 67 |
| 4.6.2.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması.....             | 67 |
| 4.6.2.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması..... | 68 |
| 4.7 Isıl İletkenliğin Hesaplanması .....  | 68 |
| 4.7.1 Alaşımların ısıl iletkenliğinin hesaplanması.....                                     | 68 |
| 4.8 Isıl Özelliklerin İncelenmesi .....   | 70 |
| 4.8.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında termal özelliklerin incelenmesi .....                       | 70 |
| 4.8.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında termal özelliklerin incelenmesi .....           | 70 |
| 4.8.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında termal özelliklerin incelenmesi .....           | 71 |
| 4.8.4 Deneysel sonuçların literatürle karşılaştırılması.....                                | 73 |
| BÖLÜM V SONUÇ VE YORUM .....  | 74 |
| KAYNAKLAR .....   | 76 |
| EKLER.....  | 84 |
| ÖZGEÇMİŞ.....   | 86 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Çizelge 3.1  | Alaşımları hazırlamak için gerekli metal miktarları.....                                  | 32 |
| Çizelge 4.1  | Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı                  | 55 |
| Çizelge 4.2  | Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı..... | 56 |
| Çizelge 4.3  | Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı..... | 57 |
| Çizelge 4.4  | Ortalama mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi.....                    | 58 |
| Çizelge 4.5  | Sn-Zn ötektik alaşımına ait mikrosertlik değerleri.....                                   | 59 |
| Çizelge 4.6  | Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımına ait mikrosertlik değerleri.....                                  | 60 |
| Çizelge 4.7  | En yüksek gerilme dayanımlarının katılaştırma hızına bağımlılıkları.....                  | 62 |
| Çizelge 4.8  | En yüksek gerilme dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi.....                      | 62 |
| Çizelge 4.9  | Sn-Zn ötektik alaşımına ait en yüksek gerilme dayanım değerleri.....                      | 63 |
| Çizelge 4.10 | Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait en yüksek gerilme dayanım değerleri .....        | 63 |
| Çizelge 4.11 | Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0-4.0 Ag alaşımına ait en yüksek gerilme dayanım değerleri.....     | 64 |
| Çizelge 4.12 | Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızına bağımlılıkları.....                         | 65 |
| Çizelge 4.13 | Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi.....                             | 65 |
| Çizelge 4.14 | Sn-8.8Zn alaşımında ölçülen özdirenç değerleri.....                                       | 67 |
| Çizelge 4.15 | Sn-8.8 Zn-1.0Ag alaşımında ölçülen özdirenç değerleri.....                                | 68 |
| Çizelge 4.16 | Entalpi ve özısı değerlerinin literatürle karşılaştırılması.....                          | 73 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Şekil 2.1  | Yarı kararlı denge durumundan kararlı denge durumuna geçiş.....   | 5  |
| Şekil 2.2  | Alaşımın katılaştırılmasında yapısal altsoğuma a) katı-sıvı arayüzeyi<br>b) katı-sıvı arayüzey önündeki çözünence zengin bölge<br>c) yapısal olarak altsoğuma.....                                  | 6  |
| Şekil 2.3  | Saf metalin katılaşmasında serbest enerji değişimi $\Delta G$ 'nin katılaştıran saf metalin çekirdekliğinin veya çekirdeğinin yarıçapıyla ilişkisi.....   | 9  |
| Şekil 2.4  | Düzlemsel kalıp duvarında küre kapağının heterojen çekirdeklenmesi.....   | 12 |
| Şekil 2.5  | Dengesiz katılaştırmaya ait faz diyagramı.....  | 14 |
| Şekil 2.6  | $C_0$ bileşimindeki bir alaşımın dengesiz katılaştırılmasında çözünen dağılımı a) katılaştırma başlangıcında b) $T^*$ sıcaklığında<br>c) tamamen katılaştıktan sonra.....                           | 16 |
| Şekil 2.7  | Dengesiz olmayan katılaşmaya ait faz diyagramı.....   | 17 |
| Şekil 2.8  | Sıvı içinde yayınmanın tam olması, katı içinde ise yayınmanın olmaması halinde katılaştırmada çözünen dağılımı a) katılaştırma başlangıcında<br>b) $T^*$ sıcaklığında c) katılaştırmadan sonra..... | 18 |
| Şekil 2.9  | a) Lamelsel yapıda arayüzey önündeki çözünen birikmesi ve<br>b) çözünenin kısa mesafe enine difüzyonu .....   | 20 |
| Şekil 2.10 | İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu.....   | 21 |
| Şekil 2.11 | Üç bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu.....  | 22 |
| Şekil 2.12 | a) Katı ve sıvı fazlar arasında malzemenin katılaşma morfolojisi ve yumuşak bölge derinliği b) Al-Cu alaşımında oluşan dendritlerin fotoğrafı.....  | 23 |
| Şekil 3.1  | Vakumlu eritme fırınının fotoğrafı.....   | 25 |
| Şekil 3.2  | Vakumlu eritme fırınının şematik gösterimi.....   | 26 |
| Şekil 3.3  | Döküm fırınının fotoğrafı.....  | 27 |
| Şekil 3.4  | Döküm fırınının şematik gösterimi.....  | 28 |
| Şekil 3.5  | Kontrollü katılaştırma fırınının şematik gösterimi.....   | 31 |
| Şekil 3.6  | Numune kalıplarının hazırlanmasında kullanılan tornanın fotoğrafı.....  | 33 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Şekil 3.7  | Grafrit numune kalıbının şematik gösterimi.....   | 33 |
| Şekil 3.8  | Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi.....   | 34 |
| Şekil 3.9  | Üst destek ile numune kalıplarının silikon yapıştırıcı yardımıyla<br>birleştirilmesi.....   | 34 |
| Şekil 3.10 | Grafitten yapılmış a) pota ve b) huninin şematik gösterimi.....   | 36 |
| Şekil 3.11 | Deney sisteminin şematik gösterimi.....   | 37 |
| Şekil 3.12 | Deney sisteminin fotoğrafı.....   | 38 |
| Şekil 3.13 | Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının iç yapısı.....   | 38 |
| Şekil 3.14 | Senkronize motorlar.....  | 39 |
| Şekil 3.15 | Epoksi-resin ile kalıplanan numuneler.....  | 39 |
| Şekil 3.16 | Numuneleri zımparalamada kullanılan bazı zımpara kağıtları.....   | 40 |
| Şekil 3.17 | Otomatik parlatma cihazının fotoğrafı.....  | 40 |
| Şekil 3.18 | Parlatmada kullanılan elmas süspansiyonlar.....   | 41 |
| Şekil 3.19 | Parlatma kumaşları.....   | 41 |
| Şekil 3.20 | Optik mikroskopun fotoğrafı.....  | 42 |
| Şekil 3.21 | Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) fotoğrafı a) dıştan görünüş<br>b) içten görünüşü.....   | 43 |
| Şekil 3.22 | Mikrosertlik test cihazının fotoğrafı.....  | 43 |
| Şekil 3.23 | Çekme gerilme-uzama eğrisi.....   | 44 |
| Şekil 3.24 | Çekme dayanımı deney sisteminin fotoğrafı.....  | 45 |
| Şekil 3.25 | Basma gerilmesi-birim uzama eğrisi.....   | 46 |
| Şekil 3.26 | Elektriksel özdirenç ölçümlerinde kullanılan dört nokta yönteminin<br>şematik gösterimi.....  | 48 |
| Şekil 3.27 | Elektriksel özdirenç ölçüm deney düzeneği.....  | 48 |
| Şekil 3.28 | Perkin Elmer Pyris Diamond DSC.....   | 50 |
| Şekil 4.1  | Doğrusal katılaştırılmış Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait ötektik mikroyapılar<br>a) enine kesit ( $V=8.3 \mu\text{m/s}$ ) (x100), b) enine kesit ( $V=41.5 \mu\text{m/s}$ ) (x100),<br>c) enine kesit ( $V=166 \mu\text{m/s}$ ) (x100) d) boyuna kesit ( $V=41.5 \mu\text{m/s}$ ) (x20)<br>e) enine kesite ait SEM fotoğrafı ( $V=41.5 \mu\text{m/s}$ )..... | 52 |
| Şekil 4.2  | Doğrusal katılaştırılmış Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait<br>mikroyapılar (x20) a) boyuna kesit b) enine kesit ( $V=8.3 \mu\text{m/s}$ ),   |    |

|   |    |
|---|----|
| c) boyuna kesit d) enine kesit (V=790 $\mu\text{m/s}$ ) e) boyuna kesite ait SEM fotoğrafı (V=41.5 $\mu\text{m/s}$ ).....   | 53 |
| Şekil 4.3 Doğrusal katılaştırılmış Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımına ait mikroyapılar (x10) a) boyuna kesit b) enine kesit (V=8.3 $\mu\text{m/s}$ ), c) boyuna kesit d) enine kesit (V=790 $\mu\text{m/s}$ ) e) boyuna kesite ait SEM fotoğrafı (V=41.5 $\mu\text{m/s}$ )..... | 54 |
| Şekil 4.4 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızı ile değişimi....   | 55 |
| Şekil 4.5 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızı ile değişimi.....  | 56 |
| Şekil 4.6 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızı ile değişimi.....  | 57 |
| Şekil 4.7 Ortalama mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi.....  | 58 |
| Şekil 4.8 Bu çalışmaya ait mikrosertlik değerlerinin Sahar ve ark. [47] tarafından Sn- ağ.% 8.8 Zn alaşımında elde edilen mikrosertlik değerleri ile karşılaştırılması.....   | 60 |
| Şekil 4.19 En yüksek gerilme dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi.....   | 61 |
| Şekil 4.10 Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi.....  | 64 |
| Şekil 4.11 Elektriksel özdirençlerin sıcaklıkla değişimi.....   | 66 |
| Şekil 4.12 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında özdirençin katılaştırma hızı ile değişimi.....   | 66 |
| Şekil 4.13 Alaşımların özdirençlerinin saf metallerle karşılaştırılması.....  | 67 |
| Şekil 4.14 Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.....   | 69 |
| Şekil 4.15 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında hesaplanan ısıl iletkenliğin, saf metallerle ve literatürle karşılaştırılması.....   | 69 |
| Şekil 4.16 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi.....  | 70 |
| Şekil 4.17 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi.....  | 71 |
| Şekil 4.18 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi.....  | 71 |
| Şekil 4.19 Alaşımların entalpilerinin gümüş miktarına bağlılığı.....  | 72 |
| Şekil 4.20 Alaşımların özısılarının gümüş miktarına bağlılığı.....  | 72 |

## KISALTMA VE SİMGELER

### KISALTMA/SİMGE

|                                  |   |                     |
|----------------------------------|---|---------------------|
| G                                | Gibbs serbest enerjisi.....                               | (J)                 |
| $\Delta H$                       | Entalpi.....  | (J/g)               |
| $\Delta C$                       | Özısı.....  | (J/g K)             |
| T                                | Sıcaklık.....   | (K)                 |
| S                                | Entropi.....  | (J/K)               |
| E                                | İç enerji.....  | (J)                 |
| P                                | Basınç.....   | (N/m <sup>2</sup> ) |
| V                                | Hacim.....  | (m <sup>3</sup> )   |
| $\Delta T$                       | Altsoğuma.....  | (K)                 |
| T <sub>e</sub>                   | Erime sıcaklığı.....                                      | (K)                 |
| C <sub>0</sub>                   | Alaşımın başlangıç bileşimi.....                          | (% ağı.)            |
| C <sub>l</sub>                   | Alaşımın sıvı faz bileşimi.....                           | (% ağı.)            |
| C <sub>s</sub>                   | Alaşımın katı faz bileşimi.....                           | (% ağı.)            |
| k                                | Çözünen dağınım katsayısı.....                            | (-)                 |
| D                                | Difüzyon katsayısı.....                                   | (m <sup>2</sup> /s) |
| V                                | Katılaştırma hızı.....                                    | (m/s)               |
| m                                | Sıvılaşma eğimi.....                                      | (K/ % at.)          |
| m <sub><math>\alpha</math></sub> | $\alpha$ fazının sıvılık eğimi.....                       | (K/ % at.)          |
| m <sub><math>\beta</math></sub>  | $\beta$ fazının sıvılık eğimi.....                        | (K/ % at.)          |
| $\Delta G_v$                     | Katı ve sıvı fazların hacim serbest enerjileri farkı..... | (J)                 |
| r                                | Embriyo yarıçapı.....                                     | (m)                 |
| r*                               | Kritik yarıçap.....                                       | (m)                 |
| $\theta$                         | Islatma (temas) açısı.....                                | (°)                 |
| f( $\theta$ )                    | Şekil faktörü.....  | (-)                 |
| f <sub><math>\alpha</math></sub> | $\alpha$ fazının hacim kesri.....                         | (-)                 |
| f <sub><math>\beta</math></sub>  | $\beta$ fazının hacim kesri.....                          | (-)                 |
| $\alpha$                         | A bileşenince zengin faz.....                             | (-)                 |



|               |  |                               |
|---------------|--|-------------------------------|
| $\beta$       | B bileşenince zengin faz.....                    | (-)                           |
| $\lambda$     | Ötektik mesafe.....                              | (m)                           |
| $\lambda_1$   | Birincil dendrit kol mesafesi.....               | (m)                           |
| $\lambda_2$   | İkincil dendrit kol mesafesi.....                | (m)                           |
| R             | Dendrit uç yarıçapı.....                         | (m)                           |
| d             | Yumuşak bölge derinliği.....                     | (m)                           |
| ağ.           | Ağırlık olarak.....                              | (-)                           |
| at.           | Atomik olarak.....                               | (-)                           |
| R             | Direnç.....                                      | ( $\Omega$ )                  |
| V             | Voltaj.....                                      | (V)                           |
| I             | Akım.....  | (A)                           |
| HV            | Mikrosertlik.....                                | (kg/mm <sup>2</sup> )         |
| P             | Uygulanan yük.....                               | (kg)                          |
| d             | İzin köşegen uzunluğu.....                       | (m)                           |
| $\theta$      | Köşegen izinin zıt yüzeyleri arasındaki açı..... | ( $^{\circ}$ )                |
| F             | Çekme kuvveti.....                               | (N)                           |
| $\sigma$      | Çekme dayanımı.....                              | (MPa)                         |
| A             | Kesit alanı.....                                 | (m <sup>2</sup> )             |
| $\varepsilon$ | Deformasyon (uzama) miktarı.....                 | (m)                           |
| $\Delta L$    | Anlık alınan deformasyon miktarı.....            | (m)                           |
| $L_0$         | Numunenin başlangıç uzunluğu.....                | (m)                           |
| $\rho$        | Özdirenç.....                                    | ( $\Omega.m$ )                |
| $2\pi s$      | Özdirenç düzeltme faktörü.....                   | (m)                           |
| $\alpha$      | Özdirencin sıcaklık katsayısı.....               | (K <sup>-1</sup> )            |
| K             | Termal iletkenlik.....                           | (W/mK)                        |
| L             | Lorenz sabiti.....                               | (W $\Omega$ /K <sup>2</sup> ) |
| $\beta_0$     | Isıtma hızı.....                                 | (K/dak)                       |
| r             | Korelasyon katsayısı.....                        | (-)                           |
| Q             | Isı.....   | (Kalori)                      |

# BÖLÜM I

## TEMEL KAVRAMLAR

### GİRİŞ

Bir alaşım sistemi, iki veya daha fazla elementin belirli bir sıcaklık, basınç ve bileşim değerinde eritilmesiyle elde edilen yeni bir katı çözeltisidir. Alaşımlar, alaşım tipine bağlı olarak kendisini oluşturan elementlerin özelliklerini taşıyabileceği gibi, bu elementlerin özelliklerinden başka yeni özelliklerde taşıyabilir. Örneğin saf bir metale alaşım elementi ilave edilerek onun mekanik özellikleri büyük ölçüde geliştirilmektedir. Alaşımlar, kendisini oluşturan elementlerin bir biri içerisindeki karışımına göre tek fazlı ve çok fazlı olmak üzere ikiye ayrılır. Heterojen bir sistemin fiziksel sınırlarla ayrılmış olan kısmına faz denir. Birbiri içerisinde her oranda homojen olarak karışabilen alaşımlar, tek fazlı alaşımlardır. Böyle bir alaşım sisteminde, alaşım elementlerinin örgü sistemlerinde bir değişiklik olur ve alaşım elementinden birisinin kristal örgüsünde her iki elementinde atomları yerleşir. Yeni örgüde farklı özelliklere sahip atomların bulunmasından dolayı gerginlik oluşur ve yeni bir malzeme ortaya çıkar. Çok fazlı alaşımlarda, alaşımı oluşturan elementlerin üstün özellikleri görülür ve kristal örgü yapılarında genellikle bir değişiklik olmaz.

Bazı saf malzemelerin kristalleşmesi büyük önem taşır. Örneğin, yüksek saflıktaki silikon tek kristallerin üretimi modern katıhal fiziği ve teknolojisi için önemli bir adımdır. Bazı elektronik cihazların temelini oluşturan birleşik (integrated) devrelerin üretimi, yeterince kusursuz büyük tek kristallerin üretilmesi ile elde edilebilir. Bu kristallerin üretilmesinde değişik katılaştırma metodları kullanılır. Bridgman tipi doğrusal (kontrollü) katılaştırma yöntemi de (Gündüz ve Çadırlı, 2002) teknolojide en çok kullanılan kristal büyütme tekniklerinden bir tanesidir.

Katılaştırma, mikroyapıyı değiştirdiği buna bağlı olarak da döküm ürünlerinin kalitesi arttırıldığı için oldukça önemlidir. Katılaştırma esnasında numunede kusurlar meydana gelebilir. Dolayısı ile katılaştırma işleminin iyi kontrol edilmesi son derece önemlidir.

Alaşımların düzlemsel cephede kontrollü olarak katılaştırılması pratikte tek kristallerin büyütülmesinde, malzemeleri arıtmada ve büyütülen malzemede kontrollü bir üniform veya üniform olmayan bileşim elde etmede kullanılır. Bu tür katılaştırmanın en önemli ticari uygulaması yarıiletkenler için tek kristallerin büyütülmesidir. Metal ve alaşımların düzlemsel cephede katılaştırılması kristalleri araştırmada çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal katılaştırma yöntemi ile alaşımların sertlik, gerilme dayanımı gibi bazı mekanik özellikleri katılaştırma parametrelerine bağlı olarak artırılabilir (Fan vd.,2010-Bei ve George, 2005).

Kalay esaslı alaşımlar kurşun esaslı alaşımların sebep olduğu zararlardan uzaktır. Bu alaşımlarla yapılan kaynakta düşük sıcaklığın yeterli olması, düşük maliyeti ve kullanımı kolaylığıyla sert kaynağa mükemmel bir alternatif yapar. Sn-Zn alaşımları da düşük erime sıcaklığına sahip olmasından, maliyetinin düşük olmasından ve iyi dayanıma sahip olduğundan Sn-Pb alaşımlarının yerini almaktadır. Bununla beraber, kolay oksitlenmesi ise bu lehim alaşımının kullanımını sınırlamaktadır. Sn-Zn alaşımının lehimlenebilme özelliğini arttırmak için bazı katkılar yapılmaktadır. Alaşımların lehimlenebilme özellikleri ve mekanik dayanımları uygun katkı miktarlarına kadar artmaktadır (El-Daly ve Hammad, 2010-Das vd., 2009).

Dolayısıyla, bu tez çalışmasında Ag katkılı Sn- ağ.% 8.8 Zn alaşımları sabit fırın sıcaklığında, farklı katılaştırma hızlarında Bridgman tipi fırında kontrollü katılaştırılıp, katılaştırma hızının mikrosertliğe, maksimum çekme gerilme dayanımına ve basma akma dayanımına etkisi araştırıldı. Alaşımların elektriksel özdirençlerinin sıcaklığa bağımlılıkları dört nokta (four-point probe method) metodu ile ölçüldü. Kompozisyon analizi için EDX (energy dispersive X-Ray), z ısı ( $\Delta C$ ) ve entalpi ( $\Delta H$ ) gibi termal özelliklerin tespit edilmesi için de DSC (differential scanning calorimeter) analizleri yapıldı.

## BÖLÜM II TEMEL KAVRAMLAR

### 2.1 Gibbs Serbest Enerjisi

Faz dönüşümlerini incelerken, verilen bir sistemde meydana gelen değişimlerle ilgileniriz. Bir faz, özellikleri ve kompozisyonu homojen olan ve sistemin diğer kısımlarından fiziksel olarak farklı olan bir kısımdır. Verilen bir sistemin bileşenleri, sistemi oluşturan kimyasal bileşenler veya farklı elementlerdir.

Faz dönüşümlerinin incelenmesi, bir alışımdaki bir ya da daha fazla fazın yeni bir faz veya faz karışımlarına nasıl dönüştüğü ile ilgilidir. Dönüşümün meydana gelmesinin nedeni alışımda başlangıç durumunun son durumuna göre kararsız olmasıdır. Fakat fazın kararlılığı nasıl ölçülür. Bu sorunun cevabı termodinamik yasaları ile açıklanır. Sabit sıcaklık ve basınçta meydana gelen dönüşümler için, sistemin bağıl kararlılığı Gibbs serbest enerjisi ile açıklanır.

Bir sistemin Gibbs serbest enerjisi,

$$G = H - TS \quad (2.1)$$

ile verilir. H entalpi, T mutlak sıcaklık ve S'de sistemin entropisidir. Entalpi ise, sistemin ısı içeriğinin (miktarının) bir ölçüsüdür ve

$$H = E + PV \quad (2.2)$$

ile verilir. E sistemin iç enerjisi, P basıncı ve V'de hacmidir. Sistemin iç enerjisi sistemdeki atomların kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Kinetik enerji sistemdeki katı ve sıvıdaki atomik titreşimlerden doğar. Potansiyel enerji ise, sistemdeki atomlar arasındaki etkileşimlerden ve bağlardan dolayı oluşur. Eğer bir dönüşüm veya reaksiyon meydana gelirse soğurulan veya salınan ısı, sistemin iç enerjisindeki değişime bağlı olacaktır. Bununla beraber sistemin hacmindeki değişime de bağlı olacaktır. Sabit basınç ve sıcaklıkta meydana gelen bir katı-sıvı faz dönüşümünde PV terimi E ile karşılaştırıldığında çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Bu durumda, entalpi  $H \approx E$  şeklinde yazılabilir.

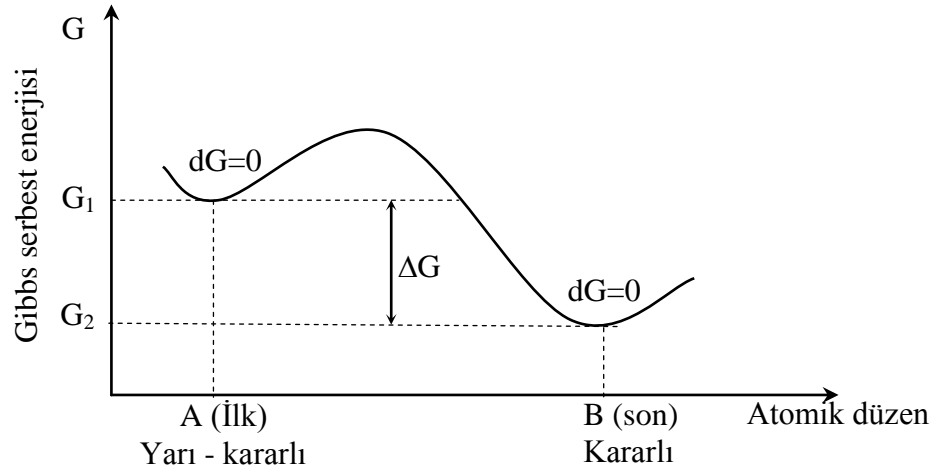
Bir sistem en kararlı haldeyken dengededir. Yani, sistem değişim göstermeyi istemez. Klasik termodinamik kanunlarının önemli bir sonucu şudur, sabit sıcaklık ve basınçta kapalı bir sistem eğer mümkün olan en düşük Gibbs serbest enerji değerine sahipse, o zaman kararlı bir şekilde dengededir. Yani,

$$dG = 0 \quad (2.3)$$

ile ifade edilir (Porter ve Easterling, 1984) Denklem 2.1'deki G'nin tanımından anlaşılacağı üzere, en yüksek kararlılık düşük entalpi ve yüksek entropi arasındaki maksimum uyumda ortaya çıkar. Böylece düşük sıcaklıklarda katı fazlar en güçlü atomik bağlanmaya sahip olduklarından en kararlı haldedir ve bu sebepten dolayı en düşük iç enerjiye ( entalpi) sahiptir. Bununla beraber daha yüksek sıcaklıklarda TS terimi daha baskın hale gelir ve atomların daha serbest hareket edebildiği sıvı ve gaz fazları daha kararlı olur.

Denklem 2.3 ile ifade edilen denge durumu, Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kararlı denge konfigürasyonu en düşük serbest enerjiye sahiptir. B kararlı denge durumudur. Bu noktada atomların dizilişindeki küçük değişimler G'de bir değişime sebep olmaz ( $dG=0$ ). Bununla beraber serbest enerjide yerel minimum değere sahip olan (A durumu) ve bu sebepten dolayı Denklem 2.3'ü sağlayan fakat G'nin mümkün olan en düşük değerine sahip olmayan başka konfigürasyonlar daima mevcuttur. Böyle konfigürasyonlar yarı kararlı denge durumları olarak adlandırılır.  $dG \neq 0$  olduğu ara durumlar kararsızdır. Termal dalgalanmalar sonucunda atomlar ara durum konumunda düzenlenirlerse (yani kararsız durumda iseler) hızlıca yeniden düzenlenerek en düşük serbest enerjili bir duruma geçerler.

Bir sistemde, sıvı-katı faz dönüşümünün olabilmesi için sistemin başlangıç durumu son durumundan daha az kararlı olmalıdır. Yani  $\Delta G = G_2 - G_1 < 0$  olmalıdır.  $G_1$  ve  $G_2$  başlangıç ve son durumların serbest enerjileridir.

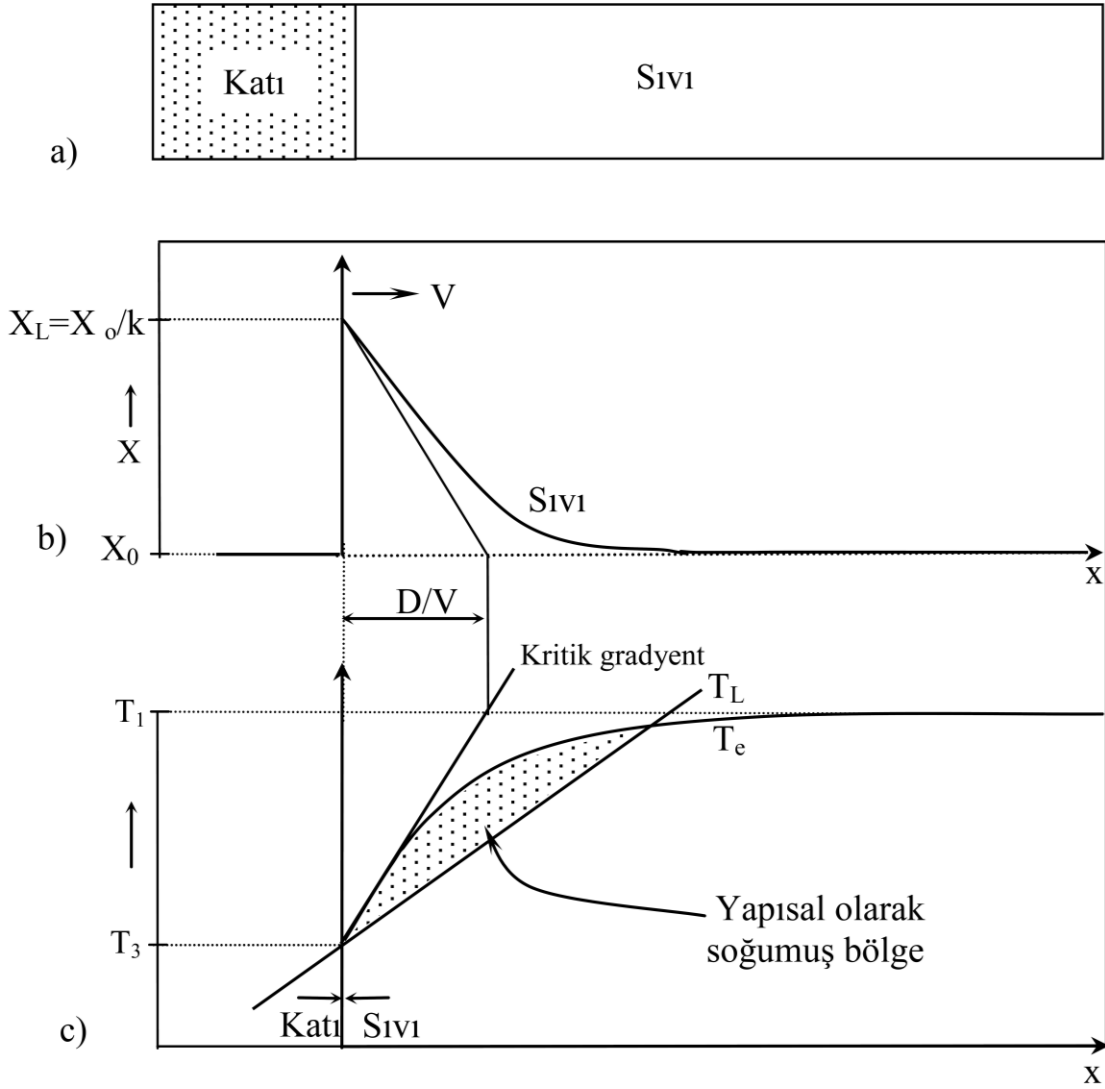


**Şekil 2.1** Yarı kararlı denge durumundan kararlı denge durumuna geçiş (Porter ve easterling, 1984)

## 2.2 Sıvı-Katı Faz Dönüşümlerinde Yapısal Alt Soğuma

Bir malzemede, sıvı fazdan katı faza geçiş için malzeme denge erime sıcaklığı ( $T_e$ ) altındaki bir sıcaklığa ( $T$ ) kadar soğutulmalıdır. Yani sistem,  $\Delta T = T_e - T$  kadar aşırı soğutulmalıdır. Alaşım sistemlerinde  $\Delta T$ ; arayüzey eğriliğine, sıvının bileşimine ve sıvı fazdan katı faza geçen atomların enerji engeline bağlıdır (Gündüz, 1984).

Arayüzeydeki düzlemsel cepheyi kararsız yapan sıcaklık değişiminin nasıl olduğu Şekil 2.2'de görülmektedir. Şekil 2.2.b'de gösterilen sıvı bileşimi  $X_L$ , arayüzeyde maximum iken, arayüzeyden uzaklaştıkça azalır ve çözünence zengin bir sıvı tabakası oluşturur. Çözünen miktar azaldıkça sıvı sıcaklığı artacağından, dengesel sıvılaşma sıcaklığı arayüzeyden uzaklaştıkça artar. Şekil 2.2.c'de arayüzey, dengesel sıvılaşma sıcaklığının üstündedir. Bu durum düzlemsel cephede kararlı bir katılaştırma için gerekli olan şartı göstermektedir. Eğer bir kararsızlık başlangıçta düz bir arayüzeyde bir çıkıntı oluşturursa bu çıkıntı aşırı ısıtılmış ortam içerisinde bulunacak ve tekrar eriyecektir. Şekil 2.2.c'de kararsız durum gösterilmektedir. Burada arayüzeyin hemen önünde sıvının gerçek sıcaklığı, dengesel sıvılaşma sıcaklığının altındadır. Bu durumda arayüzeyde oluşan bir çıkıntı aşırı soğumuş ortam içinde bulunacak ve katılaşma devam edecektir. Bu olaya yapısal alt soğuma (Rutter ve Chalmers, 1953) denilmiştir.



**Şekil 2.2** Alaşımların katılaştırılmasında yapısal alt soğuma (Davies, 1973). a) Katı-sıvı arayüzeyi b) Katı - sıvı arayüzey önündeki çözünce zengin bölge c) Yapısal olarak alt soğuma

Yapısal ifadesi, bileşimdeki değişmeden ileri geldiğini göstermektedir. Yapısal alt soğuma teorisine göre, arayüzeyde oluşan bir çıkıntı, kendisini aşırı soğumuş bir sıvı içerisinde bularak düzlemsel cephede bir kararsızlık meydana getirecektir. Arayüzeyde sıvı içerisinde çözünen konsantrasyon gradyenti,

$$\left(\frac{dX_L}{dx}\right)_{x=0} = -\frac{V}{D_L} X_L (1-k) \quad (2.4)$$

eşitliği ile verilir (Davies, 1973). Burada V, katı – sıvı arayüzeyi'nin ilerleme hızıdır.  $D_L$ , sıvı maddenin difüzyon katsayısı,  $X_L$  sıvı maddenin konsantrasyonu, k ise dengesel taksim oranıdır. Düzlemsel arayüzeyde denge olduğu kabul edilirse,

$$\left(\frac{dT_L}{dx}\right)_{x=0} = m_L \left(\frac{dX_L}{dx}\right)_{x=0} \quad (2.5)$$

eşitliği yazılabilir. Arayüzeydeki sıvı içerisinde sıcaklık gradyenti

$$G \geq \left(\frac{dT_L}{dx}\right)_{x=0} \quad (2.6)$$

değerine eşit veya bu değerden daha büyük ise yapısal aşırı soğuma yoktur.

$X_S = k X_L$  durumunda,

$$\frac{G_L}{V} \geq -\frac{m_L X_S (1-k)}{k D_L} \quad (2.7)$$

yapısal alt soğuma ifadesi elde edilir. Burada  $m_L$  sıvılaşıma eğimi,  $X_S$  katılaştıran kısmın konsantrasyonudur ve bu durumda düzlemsel cephe kararlıdır.

Alt soğuma olayında şimdiye kadar tartışıldığı gibi Gibbs serbest enerjisi, aşırı soğutulmuş bir sıvıda kararlı veya yarı kararlı fazlardan hangisinin teşekkül edeceğini belirler. Alt soğuma olayının anlaşılmasında, bir sıvının katılaşmasında başlangıç olan çekirdeklenme olayının bilinmesi gerekmektedir.



## 2.3 Çekirdeklenme

Katılaşmak üzere soğumaya bırakılan herhangi bir sıvı, erime sıcaklığına düşünce hemen katılaşmaz. Soğuma hızına bağlı olarak erime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta katılaşır. Sıvı içerisinde, önce aynı moleküllerin bir araya gelerek oluşturduğu katıya benzer bir yapı oluşur. Bu yapıya embriyo (çekirdekçik) denir. Embriyonun etrafında büyüme meydana gelir ve katılaşma başlar. Bu olaya çekirdeklenme denir. İki çeşit çekirdeklenme vardır bunlar homojen ve heterojen çekirdeklenmedir.

### 2.3.1 Homojen çekirdeklenme

Homojen çekirdeklenme, sıvı metalin yani eriyiğin kendi atomlarının çekirdek oluşturduğu durumlarda meydana gelir. Saf sıvı metal denge katılaşma sıcaklığının yeteri kadar altına soğuduğunda, yavaşlayan atomların birbirine bağlanmasıyla homojen çekirdeklenme oluşur. Homojen çekirdeklenme bazen birkaç yüz derece santigrada kadar ulaşan bir alt soğumaya ihtiyaç gösterir. Bir çekirdeğin kristal olarak büyüyecek kararlılıkta olabilmesi için kritik bir boyuta ulaşmış olması gerekir.

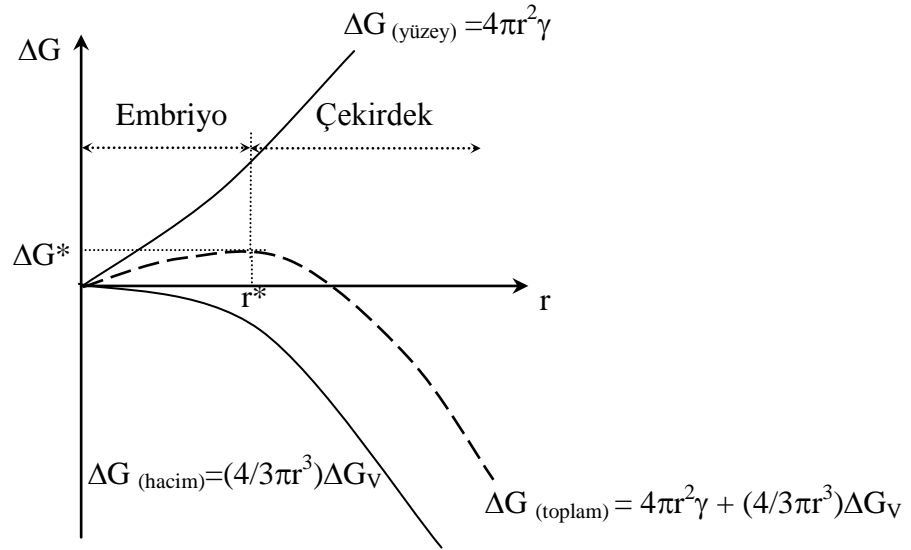
Katılaşan bir saf metalde iki tür enerji gözönüne alınmalıdır. (1) sıvının katıya dönüşmesi sırasında açığa çıkan hacim serbest enerjisi, (2) katılaşan parçacığın katı yüzeylerinin meydana gelebilmesi için gerekli yüzey enerjisi.

Örneğin kurşun gibi bir saf metal denge katılaşma sıcaklığının altına soğutulduğunda, sıvıdan katıya dönüşümü sağlayan enerji, katı ve sıvının hacim serbest enerjileri arasındaki  $\Delta G_v$  farkıdır.  $\Delta G_v$  birim metal hacminin sıvı ve katı durumu arasındaki serbest enerji farkı olmak üzere,  $r$  yarıçaplı küresel bir çekirdek için serbest enerji değişimi  $\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v$  olacaktır. Çekirdekçiğin ve çekirdeğin yarıçaplarına bağlı olarak hacim serbest enerjisindeki değişme Şekil 2.3'de en alttaki eğriyle gösterilmiştir. Sıvıdan katıya dönüşüm sırasında enerji açığa çıktığından, hacim serbest enerjisindeki değişme eksi değerli bir niceliktir.

Fakat bir taraftan da çekirdekçik ve çekirdeğin oluşmasına karşı çıkan bir enerji vardır. Küresel çekirdekçik ve çekirdeğin yüzeylerinin oluşması için gerekli enerji  $\Delta G_y$ . Bu

küresel katı parçacıklara bir yüzey üretmek için gereken  $\Delta G_y$  enerjisi, küresel parçanın özgül yüzey serbest enerjisi  $\gamma$  ile kürenin yüzeyinin ( $4\pi r^2$ ) çarpımına eşittir:  $4\pi r^2 \gamma$ . Katı parçacıkların oluşmasını engellemeye çalışan bu  $\Delta G_y$  enerjisi, Şekil 1.3'de üst yarıda yukarı doğru yükselen bir eğri halinde gösterilmiştir. Şekil 2.3'de ortadaki eğri ise, çekirdekçiğin veya çekirdeğin oluşmasıyla ilgili toplam serbest enerjiyi göstermektedir ve hacim serbest enerjisi ile yüzey serbest enerjisinin toplamıdır (Aserland, 1990). Saf bir metalin katılaşması sırasında  $r$  yarıçapında bir çekirdekçiğe veya çekirdeğin oluşumu için toplam serbest enerji değişimi aşağıdaki formülle verilebilir:

$$\Delta G_T = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma \quad (2.8)$$



**Şekil 2.3** Saf metalin katılaşmasında serbest enerji değişimi  $\Delta G$ 'nin katılaşan saf metalin çekirdekçiğinin veya çekirdeğinin yarıçapıyla ilişkisi (Verhoeven, 1975)

Saf metalin katılaşmasıyla oluşan katı metal atom kümelerinin yarıçapı kritik yarıçap  $r^*$ 'dan küçükse, bunların yeniden çözünmeleriyle sistemin enerjisi azalacaktır. Dolayısıyla bu küçük çekirdekçikler sıvı metalde yeniden çözünebilirler. Fakat katı parçacıklar  $r^*$ 'dan büyük yarıçapa sahipse, bu kez sistemin enerjisi çekirdeklerin büyümesi veya kristaller haline gelmesiyle azalacaktır.  $r$ ,  $r^*$ 'a eşit olduğunda  $\Delta G_T$  en büyük değeri olan  $\Delta G^*$ 'a ulaşacaktır.  $r = r^*$  olduğunda toplam serbest enerji  $\Delta G_T$ 'nin

$r$ 'ye göre türevi sıfırdır. Çünkü bu noktada çekirdek veya çekirdekçik yarıçapı en yüksek değerdedir ve eğim  $d(\Delta G_T)/dr = 0$ 'dır. Buna göre;

$$d(\Delta G_T)/dr = \frac{d}{dr} \left( -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma \right) = -4\pi r^2 \Delta G_V + 8\pi r \gamma$$

$$r = r^* \text{ için } -4\pi (r^*)^2 \Delta G_V + 8\pi r^* \gamma = 0$$

$$r^* = \frac{2\gamma}{\Delta G_V} \quad (2.9)$$

elde edilir.

**Kritik yarıçapın alt soğumayla değişimi:** Metalin denge erime sıcaklığının altında,  $\Delta T$  alt soğuması büyüdükçe hacim serbest enerjisi  $\Delta G_V$ 'deki değişim de büyüyecektir. Donma sıcaklığı civarında  $\Delta T$  sifira yaklaştığından kritik çekirdeğin çapı sonsuz olacaktır. Buna karşılık alt soğumanın miktarı arttıkça kritik çekirdek çapı küçülecektir.

Bir  $T$  sıcaklığındaki katı ve sıvının Gibbs serbest enerjisindeki değişim,

$$\Delta G_V = G_S - G_K = (H_S - T S_S) - (H_K - T S_K) = H_S - H_K - T(S_S - S_K)$$

$$\Delta G_V = \Delta H - T \Delta S \quad (2.10)$$

olarak bulunur. Denge erime sıcaklığı  $T_m$ 'de katı ve sıvının serbest enerjileri eşit olacağından

$$\Delta G_V = \Delta H - T \Delta S = 0$$

olur, buradan

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_m} = \frac{L}{T_m} \quad (2.11)$$

şeklinde bulunabilir. Burada  $L$  erime gizli ısıdır. Denklem 1.10 ve denklem 1.11'den

$$\Delta G_V = L - \frac{T L}{T_m} = \frac{L T_m - T L}{T_m} = L \left( \frac{T_m - T}{T_m} \right) = L \frac{\Delta T}{T_m} = \Delta H \frac{\Delta T}{T_m} \quad (2.12)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik, sıvı-katı faz geçişi için, gerekli olan hacim başına enerji değişimi (sürücü kuvvet) olarak bilinir (Porter ve Asterling, 1984).

Denklem 2.12, denklem 2.9'da yerine yazılırsa ve  $\Delta H$ 'ı katı için yazarsak,

$$r^* = \frac{2\gamma T_m}{\Delta H_K \Delta T} \quad (2.13)$$

elde edilir. Burada,  $r^*$  kritik çekirdeğin yarıçapı,  $\gamma$  yüzey serbest enerjisi,  $\Delta H_K$  katılma gizli ısı,  $\Delta T$  ise çekirdeğin oluştuğu alt soğuma miktarıdır.

Denklem 2.8'de  $r = r^*$  yazılırsa

$$\Delta G^* = -\frac{4}{3}\pi(r^*)^3 \Delta G_V + 4\pi(r^*)^2 \gamma_{SL} \quad (2.14)$$

haline gelir. Denklem 2.9, denklem 2.14'de yerine yazılırsa

$$\Delta G^* = \frac{16\pi(\gamma_{SL})^3}{3(\Delta G_V)^2} \quad (2.15)$$

Elde edilir.

Denklem 2.12 'deki  $\Delta G_V$  değeri, denklem 2.9 ve denklem 2.15'de ayrı ayrı yerine yazılırsa

$$r^* = \left(\frac{2\gamma_{SL}T_m}{L_v}\right) \frac{1}{\Delta T} \quad (2.16)$$

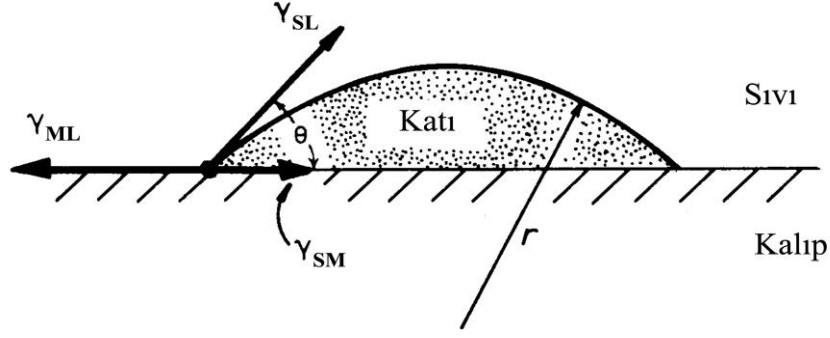
$$\Delta G^* = \left(\frac{16\pi\gamma_{SL}T_m^2}{3L_v^2}\right) \frac{1}{(\Delta T)^2} \quad (2.17)$$

denklemleri elde edilir.  $r^*$  ve  $\Delta G^*$  değerleri artan altsoğuma ile azalmaktadır.

### 2.3.2 Heterojen çekirdeklenme

Heterojen çekirdeklenme, bir sıvıda içinde bulunduğu kabın çözünmeyen katışkılarının veya kararlı bir çekirdeğin oluşması için gerekli alt soğumayı azaltan herhangi bir maddenin yüzeyinde meydana gelen çekirdeklenmedir. Heterojen çekirdeklenmenin oluşması için çekirdekleyici maddenin (katışkı veya kap) sıvı metalle ıslanması gerekir. Aynı zamanda sıvı, çekirdekleyicinin üzerinde kolaylıkla katılmalıdır. Şekil 2.4, katılma sıvı tarafından ıslatılan çekirdekleyici maddenin katı metalle çekirdekleyici madde arasında dar bir  $\theta$  açısı yaptığını göstermektedir. Heterojen çekirdeklenmenin çekirdekleyici madde üzerinde meydana gelmesinin nedeni, bu durumda kararlı bir çekirdek oluşturmak için gerekli yüzey enerjisinin, çekirdeğin saf sıvı içinde kendi kendine oluşmasından (homojen çekirdeklenme) daha düşük olmasıdır. Heterojen çekirdeklenmede yüzey enerjisi daha düşük olduğundan, kararlı bir çekirdek oluşturmak için gerekli toplam serbest enerji değişimi ve çekirdeğin kritik yarıçapı daha düşük olacaktır. Dolayısıyla, heterojen çekirdeklenmede kararlı bir çekirdek oluşturmak için çok daha küçük alt soğumalara ihtiyaç vardır (Woodruff, 1973).

Tamamen düz bir kalıp ile temas halinde oluşan katı embriyoyu ele alalım.  $\gamma_{SL}$ 'nin izotropik olduğu varsayılarak, kalıp duvarı düzleminde  $\gamma_{ML}$ ,  $\gamma_{SM}$  ve  $\gamma_{SL}$  arayüzey gerilimlerinin dengede olması halinde, embriyo  $\theta$  ıslatma açılı küresel kapağa sahip olursa verilen bir katı hacmi için sistemin toplam serbest enerjisi minimuma indirgendiği gösterilebilir;



**Şekil 2.4** Düzlemsel kalıp duvarında küre kapağının çekirdeklenmesi (Elliott, 1983)

$$\gamma_{ML} = \gamma_{SM} + \gamma_{SL} \cos \theta \quad (2.18)$$

Dikkat edilirse  $\gamma_{SL}$ 'nin düşey bileşeni dengelenmemiş olarak kalır. Zamanla bu kuvvet kalıp yüzeyini, her yönde yüzey gerilimleri dengelenene dek, yukarı yönde çeker. Bu nedenle Denklem 2.18 sadece kalıp duvarının düzlemsel olarak kaldığı durumda optimum embriyo şeklini verir.

Böylece embriyonun oluşumuna ilişkin fazlalık serbest enerjisi

$$\Delta G_{het} = -V_S \Delta G_v + A_{SL} \gamma_{SL} + A_{SM} \gamma_{SM} - A_{SM} \gamma_{ML} \quad (2.19)$$

olarak verilir. Burada  $V_S$  küresel kapağın hacmi,  $A_{SL}$  ve  $A_{SM}$  katı/sıvı ve sıvı/kalıp arayüzeylerinin alanları, ve  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{SM}$  ve  $\gamma_{ML}$  katı/sıvı, katı/kalıp ve kalıp/sıvı arayüzeylerinin serbest enerjileridir. Dikkat edilirse, burada üç arayüzeyli enerji katkısı vardır. Bunlardan ilk ikisi çekirdeklenme olayı esnasında oluşan arayüzeyden geldiğinden pozitifdir. Buna karşın üçüncüsü küresel kapağın altındaki kalıp/sıvı arayüzeyinin yıkımından dolayı negatif enerji katkısında bulunur.

Denklem 2.19, ıslatma açısı  $\theta$  ve kapak yarıçapı  $r$  cinsinden yazılabilir:

$$\Delta G_{het} = \left\{ -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \gamma_{SL} \right\} f(\theta) \quad (2.20)$$

dikkat edilirse, bu denklem  $f(\theta)$  çarpanı haricinde homojen çekirdeklenme için elde edilen Denklem 2.8 ile aynıdır.  $f(\theta)$ 'nin sayısal değeri  $\leq 1$  olup sadece çekirdeğin şekline yani  $\theta$ 'ya bağlıdır. Bu nedenle  $f(\theta)$  şekil faktörü olarak adlandırılır. Kritik yarıçapta  $\frac{d\Delta G}{dr} = 0$  şartı denklem 2.20'e uygulanırsa kritik yarıçap

$$r^* = \frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_v} \quad (2.21)$$

ve denklem 2.21, denklem 2.20'de yerine yazılırsa

$$\Delta G_{het}^* = \frac{16\pi\gamma_{SL}^3}{3\Delta G_v^2} \cdot f(\theta) \quad (2.22)$$

Elde edilir.  $f(\theta) = \frac{1}{4}(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)$ 'ya eşittir. Dolayısıyla,  $f(\theta)$  şekil faktörü sayesinde heterojen çekirdeklenmeye karşı aktivasyon enerji bariyeri  $\Delta G_{het}$ 'nin değeri  $\Delta G_{hom}$ 'e nazaran daha düşüktür. Ayrıca,  $r^*$  kritik yarıçapının değeri kalıp duvarından etkilenmez ve sadece altoğumaya bağlıdır.

Denklem 2.15 ve Denklem 2.22'ün birleştirilmesinden aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\Delta G_{het}^* = f(\theta) \Delta G_{hom}^* \quad (2.23)$$

## 2.4 Alaşım ve Alaşımların Katılaştırılması

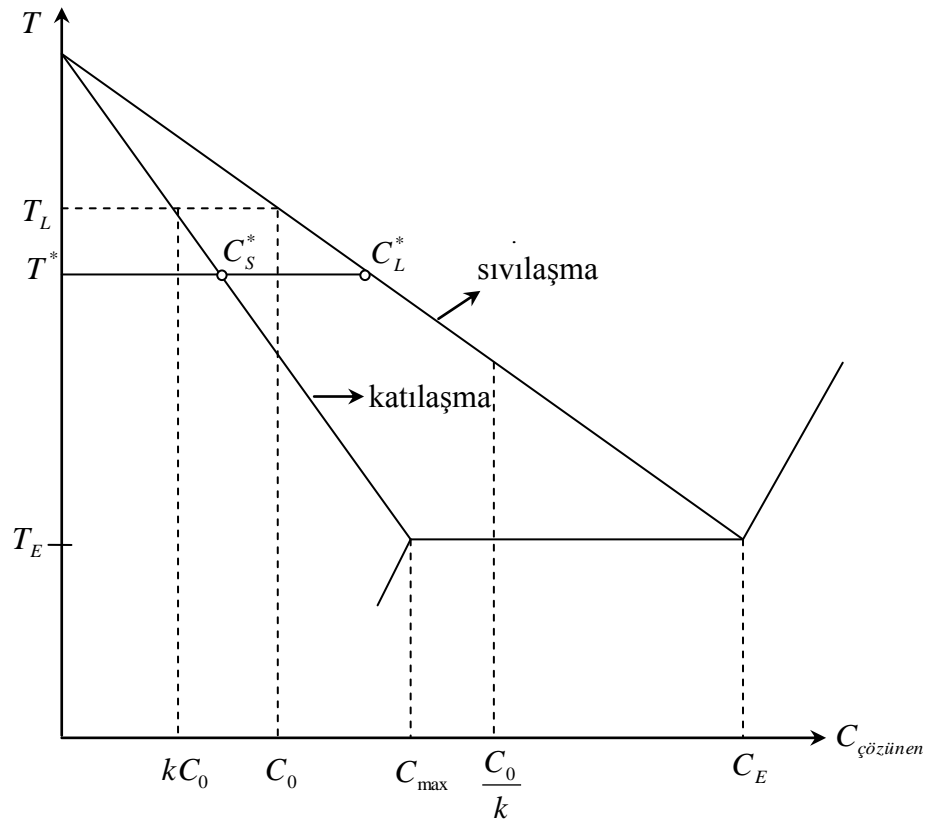
### 2.4.1 Tek fazlı alaşımların katılaştırılması

Birçok metalin sıvı eriyiklerinden katılaştırılmalarında, büyüme esnasında arayüzeyde denge olduğunun kabul edilmesi çok iyi bir yaklaşıktır. Yani katılaştırma esnasında katı ve sıvı içinde büyük bileşim gradyanları olabilir fakat arayüzeyden geçişte atomların aktarılmasına karşı sadece ihmal edilebilir bir direnç mevcuttur. Düzlemsel cephede büyüyen  $C_0$  alaşımının tek kristalini düşünelim (Şekil 2.5). Katı-sıvı arayüzeyinde dengeye  $T_L$  sıvılaştırma sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda erişilebilir. Şayet katılaştırma  $T^*$  sıcaklığında oluyorsa, arayüzeyde dengenin olması, denge

diyagramında belirtildiği üzere, sıvı ve katı bileşimlerinin arayüzeyde sırasıyla  $C_L^*$  ve  $C_S^*$  olmasını gerektirir. Bu şartlar altında katılaştırmayı tarifte bir  $k$  dağılım katsayısı,

$$k = \frac{C_S^*}{C_L^*} \quad (2.24)$$

eşitliği ile ifade edilir. Sıvılaşma ve katılaşma çizgileri, Şekil 2.5'den görüldüğü gibi, lineer ise  $k$  bir sabittir. Çeşitli ifadeleri çıkarmada matematiği basitleştirmek için  $k$  sabit kabul edilmiştir. Aşağıda yapılan irdelemelerin çoğunda  $k$  birden küçük kabul edilmiştir; yani faz diyagramında sıvılaşma ve katılaşma eğimi aşağı doğrudur. Uygulamada böyle alaşımın katılaştırmada ki yöntem, sıcaklık gradyenti, soğuma hızı ve büyüme hızındaki kompleks duruma bağlıdır. Düzlemsel bir katı/sıvı arayüzeyin hareketinin uzun bir alaşım çubuk boyunca olduğunu düşünerek konuyu basitleştirelim. Uygulamada böyle tek yönlü katılaştırma, ısının çubuk boyunca uzaklaştırılabildiği özel olarak yapılan bir fırın içindeki potaya konan alaşımın belli bir sıcaklık gradyentinde katılaştırılmasıyla elde edilir.



Şekil 2.5 Dengesel katılaştırmaya ait faz diyagramı (Flemings, 1976)

### 2.4.1.1. Dengesel katılaştırma

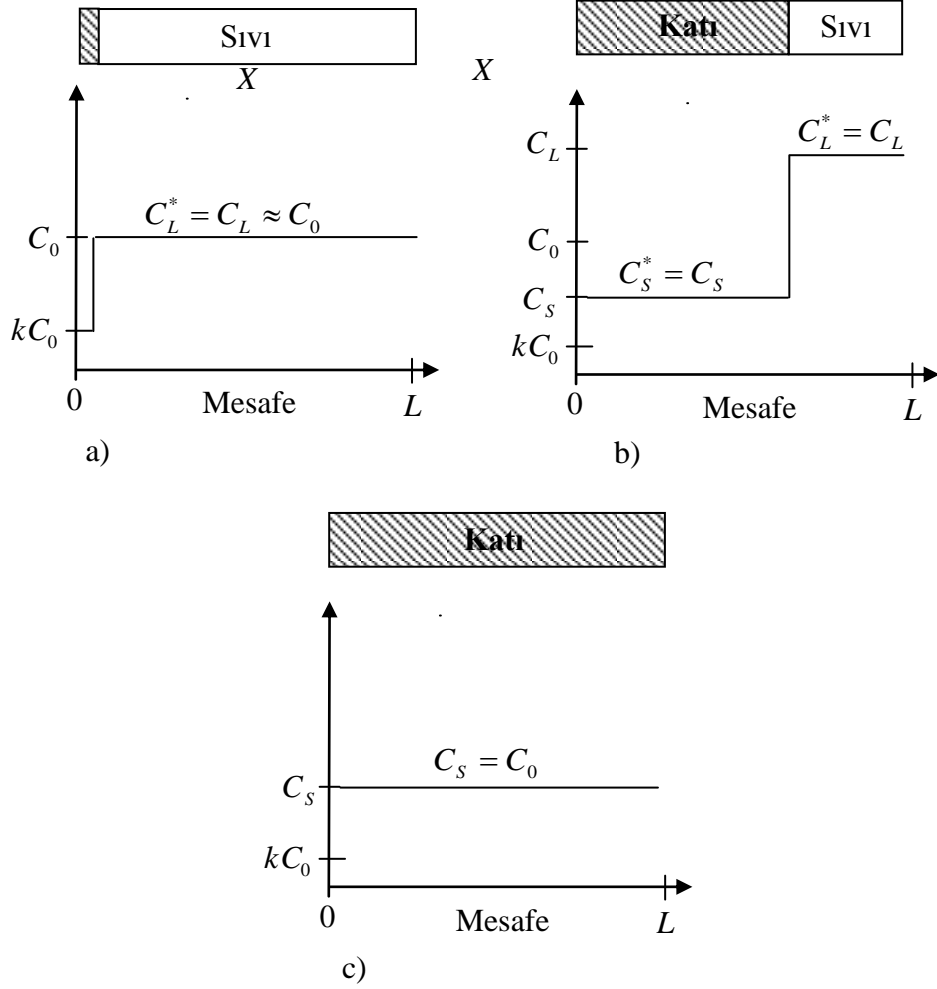
Kristal büyütmede katılaştırma hemen hemen hiçbir zaman dengesel katılaştırmaya yaklaşılacak derecede yeteri kadar olmamasına rağmen,  $L^2 \ll D_s t$  olduğu zaman böyle bir katılaştırma mümkündür. Burada,  $L$  büyüyen kristalin boyunu,  $D_s$  çözünenin katı içinde yayınma katsayısını ve  $t$  ise zamanı göstermektedir. Yukarıda belirtilen kabullere ilaveten dengesel katılaştırmada sıvı ve katı içinde tam yayınma olduğu kabul edilir.

$L$  uzunluğunda bir pota içinde başlangıçtaki bileşimi  $C_0$  olan sıvı haldeki alaşımın bir uçtan katılaştığını düşünelim. İlk katı  $T_L$  sıcaklığında ve  $kC_0$  bileşiminde teşekkül etmeye başlar. Katı içindeki çözünen miktarı başlangıçta sıvının haiz olduğu bileşimden düşüktür. Arta kalan çözünen katı-sıvı arayüzeyinden geri döndürülür ve bu miktar sıvı içine yayılır (Şekil 2.6a). Daha sonraki soğutma ve katılaştırma esnasında sıvı ve katının ikisi de çözünen bakımından zenginleşir.  $T^*$  sıcaklığında katı-sıvı arayüzeyinde  $C_S^*$  bileşiminde teşekkül eden katı,  $C_L^*$  bileşimindeki sıvı ile denge halindedir. Katı ve sıvı içindeki yayınmanın tam olması sebebiyle bütün katı  $C_S = C_S^*$  ve bütün sıvı da  $C_L = C_L^*$  üniform bileşiminde olur (Şekil 2.6b).  $T^*$  sıcaklığında genel madde dengesi (çözünen atomların korunumu) şöyle yazılır,

$$C_S f_S + C_L f_L = C_0 \quad (2.25)$$

burada,  $f_S$  ve  $f_L$  sırasıyla katı ve sıvının ağırlık oranlarıdır. Bu eşitlik basit manivela denge kuralı olarak bilinir.  $f_S + f_L = 1$  olduğundan belirli bir sıcaklıkta katı oranını bulmak için kolaylıkla çözülebilir.



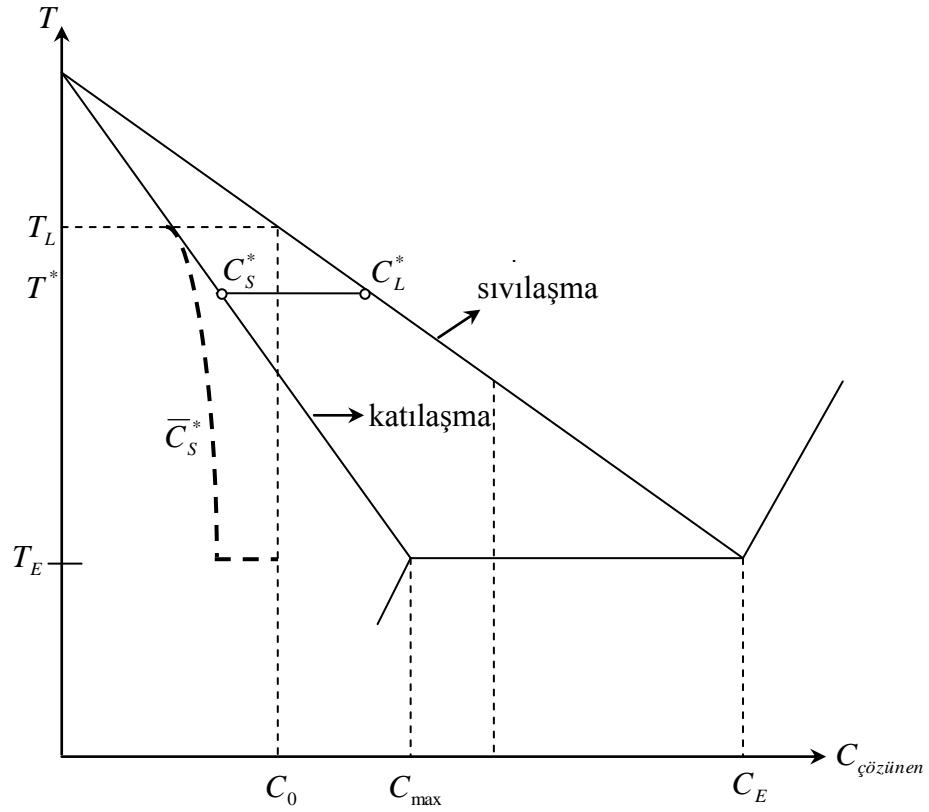


**Şekil 2.6**  $C_0$  bileşimindeki bir alaşımın dengesel katılaştırılmasında çözünen dağınımı  
a) katılaştırma başlangıcında b)  $T^*$  sıcaklığında c) tamamen katılaştıktan sonra  
(Flemings, 1976)

#### 2.4.1.2 Katı içinde yayınmanın olmaması, sıvı içerisinde yayınmanın tam olması

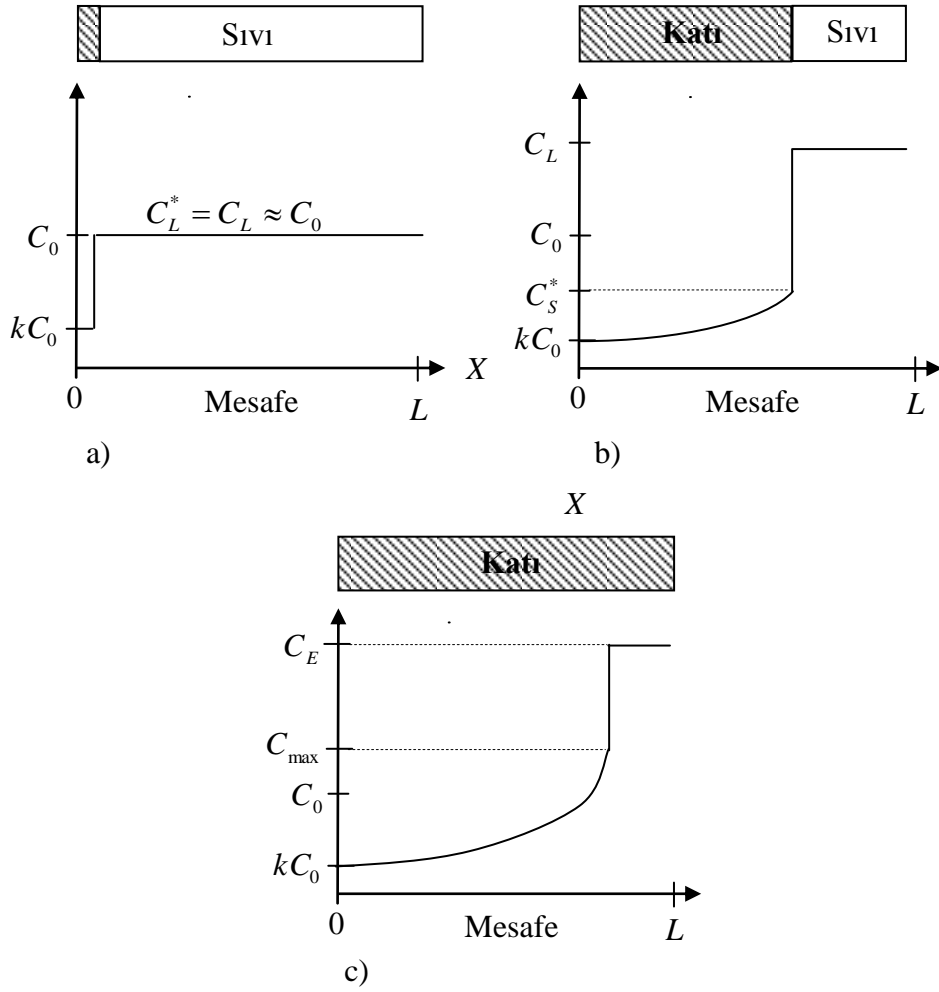
Yine,  $L$  uzunluğundaki bir pota içinde başlangıçtaki bileşimi  $C_0$  olan sıvı haldeki alaşımın bir uçtan katılaştığını düşünelim. Dengesel olmayan katılaştırmaya ait faz diyagramı Şekil 2.7'de görülmektedir.

Dengesel katılaştırmada olduğu gibi,  $T_L$  sıcaklığında ilk teşekkül eden az miktardaki katının bileşimi  $kC_0$ 'dır (Şekil 2.8a).  $kC_0 < C_0$  olduğundan, ilk oluşan katı kendisini oluşturan sıvıdan daha saf olacak, böylece çözünen madde sıvı içerisine atılacak ve sıvının bileşimini  $C_0$ 'dan daha fazla olacaktır (Şekil 2.8b).



**Şekil 2.7** Dengesel olmayan katılaşmaya ait faz diyagramı (Porter ve Easterling, 1984)

Arayüzey sıcaklığı, daha fazla katı oluşmadan  $T_L$  sıcaklığının altına düşecektir. Daha sonraki soğutma ve katılaştırma esnasında bir sonraki katı tabakası, ilkinе göre çözünence biraz daha zengin olacaktır. Bunun gibi olaylar zinciri, sıvının çözünence daha zengin hale gelmesini sağlar ve katılaştırma devamlı olarak daha düşük sıcaklıklarda meydana gelir (Şekil 2.8c). Bununla beraber, katı içinde yayınma olmadığından katılaştırmanın ilk kademelerinde teşekkül eden katının bileşimi değişmez. Ortalama katı bileşimi  $\bar{C}_S^*$  katı-sıvı arayüzeyde ki bileşimden daima daha düşüktür (Şekil 2.7’de kesikli çizgilerle gösterilmiştir). Numune daha fazla katılaştıkça, sıvı çözünence  $\frac{C_0}{k}$ ’dan daha zengin hale gelir ve ötektik kompozisyona ( $C_E$ ) ulaşabilir. Böylelikle numune katılaşarak  $T_E$  ötektik sıcaklığa ulaştığında  $\alpha + \beta$  ötektik yapı meydana gelir. Tamamen katılaşmış çubuk Şekil 2.8c’de görüldüğü gibi  $\bar{C}_S^* = C_0$  olan çözünen dağılımına sahip olacaktır.



**Şekil 2.8** Sıvı içinde yayınmanın tam olması, katı içinde ise yayınmanın olmaması halinde katılaştırmada çözünen dağılımı a) katılaştırma başlangıcında b)  $T^*$  sıcaklığında c) katılaştırmadan sonra (Flemings, 1976)

$T^*$  sıcaklığında  $C_L^*$  bileşimindeki sıvıdan meydana gelen katının bileşimi  $C_S^*$ 'dir. Küçük miktarda katı teşekkül ettiği zaman geriye dönen çözünen miktarının sıvı içindeki çözünen artışına eşitlenmesiyle kantitatif bir ifade bulunur. Bu denge şöyle yazılır,

$$(C_L - C_S^*)df_S = (1 - f_S)dC_L \quad (2.26)$$

Dağılım katsayısını yerine koyar,  $f_S = 0$ 'da  $C_S^* = kC_0$ 'dan integre edilirse katı-sıvı arayüzeyindeki  $C_S^*$  katı bileşimi katı oranının fonksiyonu olarak bulunur. Bulunan ifade,

$$C_S^* = kC_0(1 - f_S)^{(k-1)} \quad (2.27)$$

veya, sıvı bileşimi ve sıvı oranının fonksiyonu olarak,

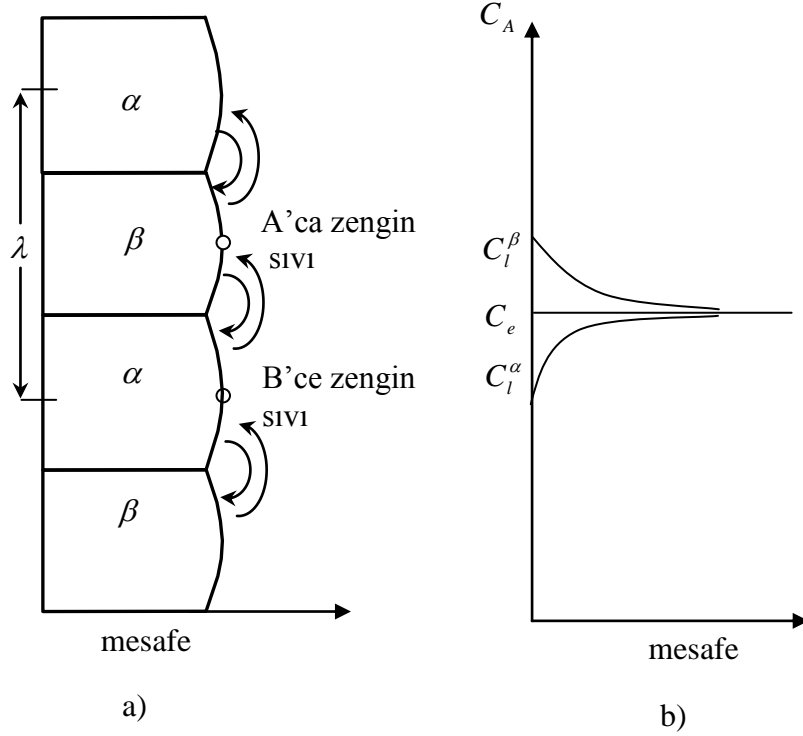
$$C_L = C_0 f_L^{(k-1)} \quad (2.28)$$

şeklinde elde edilir. Bu eşitlikler Scheil (Scheil, 1942) eşitliği olarak isimlendirilir.

## 2.5 Alaşımların Ötektik Katılaştırılması

Alaşım katılaştırılması sırasında çözüneneye bağlı olarak ortaya çıkan bir başka yapı da ötektik yapıdır. Lamelsel yapı ise yaygın gözlenen bir ötektik yapı çeşididir. Ötektik fazlar sıvı içerisinde çekirdeklenir ve büyüme sırasında yapısal özellikleri gelişir. Lamellerin büyüme yönü katı-sıvı arayüzeyine diktir. Katılaştırma hızı veya arayüzey hızı, sıvı içerisinde arayüzeye yakın bölgedeki çözünenin kısa mesafe difüzyonuna bağlıdır. Bu difüzyon, uzun mesafe difüzyon gereksinimini ortadan kaldırır ve fazların birlikte büyümesine neden olur. Katı-sıvı arayüzeyinde atomik aktarım, katı ve sıvı fazların her bir arayüzeyde yarı kararlı dengede olabilmesi için yeterince hızlıdır. Denge ötektik sıcaklığın altındaki bir  $T$  büyüme sıcaklığında  $\alpha$  katı faz kompozisyonu  $C_s^\alpha$ 'nın sıvı faz kompozisyonu  $C_l^\alpha$  ile yarı kararlı dengede olduğunu ve  $\beta$  katı faz kompozisyonu  $C_s^\beta$ 'nin de sıvı faz kompozisyonu  $C_l^\beta$  ile yarı kararlı dengede olduğunu göstermektedir.

Lameller büyürken A bileşeni  $\beta$ -sıvı arayüzeyi önünde, B bileşeni ise  $\alpha$ -sıvı arayüzeyi önünde birikir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi, fazlar birlikte büyürken, A bileşenin konsantrasyon gradyenti  $\alpha$  fazına doğru azalır. Benzer şekilde, B bileşenin konsantrasyon gradyenti de  $\beta$  fazına doğru azalır. Bu difüzyonu sağlayan gradyent yaklaşık olarak  $2\Delta C / \lambda$ 'dir.



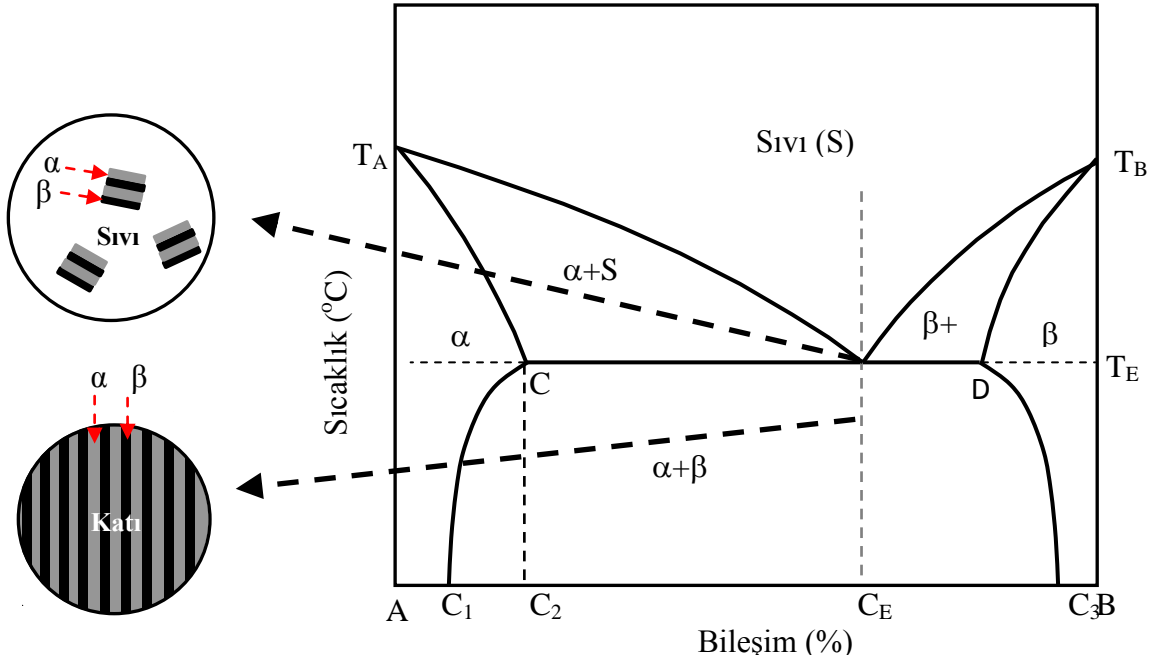
**Şekil 2.9** a) Lamelsel yapıda arayüzey önündeki çözünen birikmesi ve b) çözünenin kısa mesafe enine difüzyonu (Elliott, 1983)

### 2.5.1 İkili ve üçlü faz diyagramları

Ötektik alaşımı oluşturan iki bileşenli sistemlerde, bileşenler birbirinin erime sıcaklıklarını düşürür ve ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda iki farklı katı faza dönüşür. Dolayısıyla ötektik reaksiyon,



şeklinde ifade edilir. Bu tür reaksiyona sahip sistemlere de ötektik sistemler denir. Bu reaksiyon esnasında iki katı faz yan yana gelerek ince tabakalar halinde şekillenir ve ötektik yapı oluşur. Ötektik yapının oluşumu; katılaşma hızı, sıcaklık gradyenti ve alaşımın bileşimine göre değişim gösterir. Şekil 2.10'de iki bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve katılaşma yapısı verilmektedir.

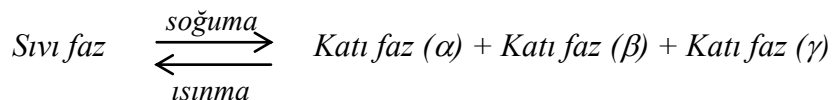


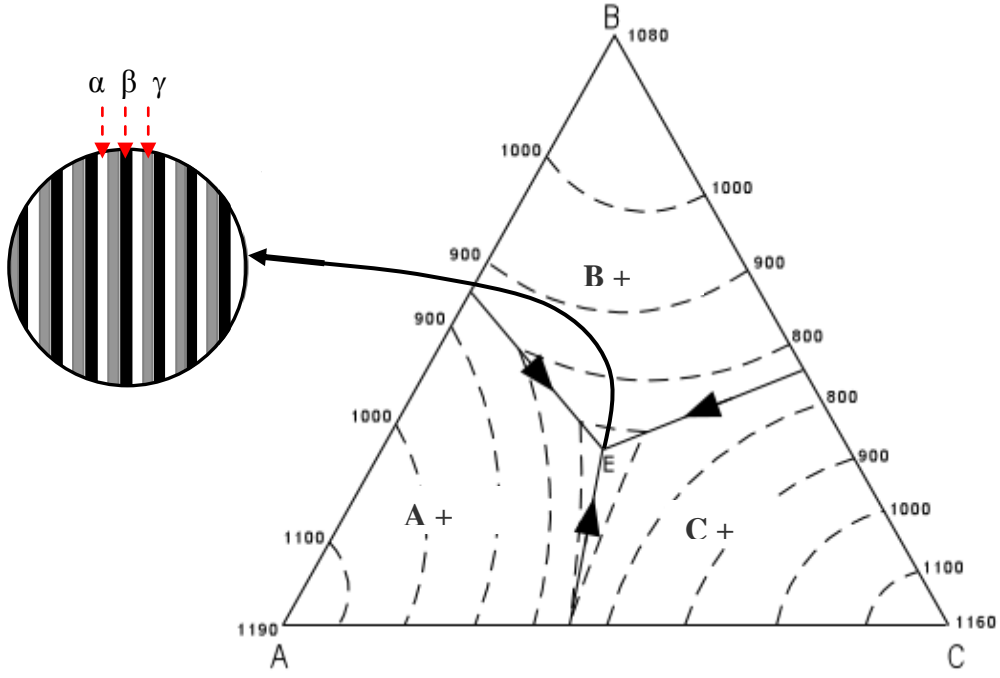
**Şekil 2.10** İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu (Askeland, 1990)

Faz diyagramındaki sembollerden  $C_E$  ötektik bileşim,  $T_E$  ötektik sıcaklık,  $T_A$  ve  $T_B$  A ve B bileşenlerin saf haldeki erime sıcaklıkları,  $C_1$  oda sıcaklığında B metalinin  $\alpha$  fazındaki çözünme sınırı,  $C_2$  B metalinin  $\alpha$  fazındaki en yüksek erime sınırı,  $C_3$  A metalinin  $\beta$  fazındaki en yüksek erime sınırı anlamına gelmektedir.

Faz diyagramında gösterilen  $C_E$  ötektik bileşimindeki alaşım sistemi, sıvı halden soğuyarak,  $T_E$  ötektik sıcaklığa geldiğinde, ötektik reaksiyon sonucu  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları oluşur. Bu dönüşüm sırasında  $\alpha$  ve  $\beta$  kristalleri yan yana, sık ve ince tabakalar halinde büyür ve katılaştırma şartlarına bağlı olarak ötektik yapı oluşur.

Üçlü ötektik alarımların sınıflandırılması ikili ötektik alarımlara göre oldukça zor ve karmaşıktır. Üçlü ötektik alarımların bileşen sayısının ikili sistemlere göre daha fazla olması katılaştırma neticesinden sayıca fazla yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde Şekil 2.11'de üç bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu verilmiştir. Üç bileşenli sistemlerde ise, ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda üç farklı katı faza (veya iki-üç intermetalik faza) dönüşür.



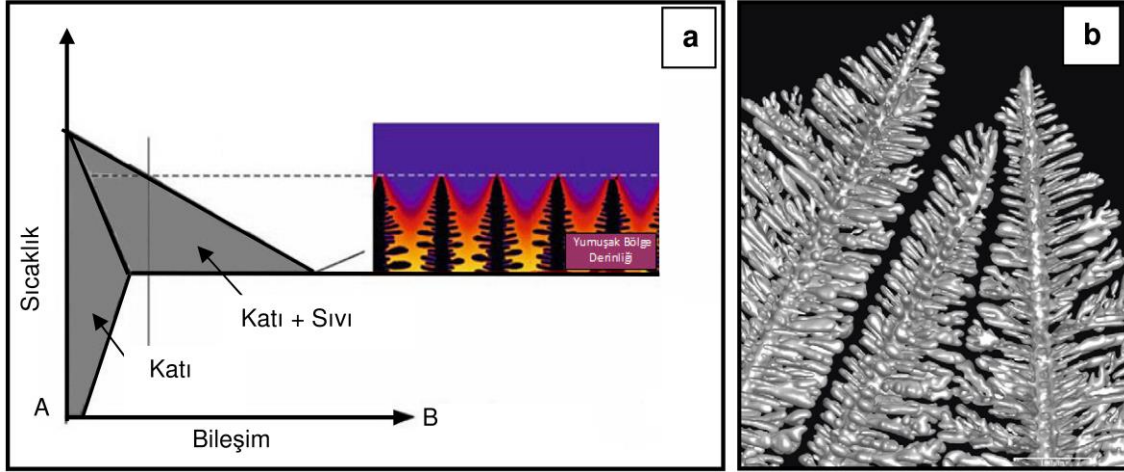


**Şekil 2.11** Üç bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu (West, 1982)

## 2.6 Alaşımın Dendritik Katılaştırılması

Dendritik katılaştırma, hücreli katılaştırmanın bir sonraki aşamasıdır. Çözelti içindeki bileşim gradyanları yapısal aşırı soğumaya neden olur. Bu ise arayüzeyin bozularak hücreli hale geçmesine neden olur. Bu durum da çözünen miktarının yanlara doğru itilmesine sebep olduğu için yapısal aşırı soğumayı daha da artırır. Sonuçta birincil (ana) kollara dik ikincil kollar oluşur ve büyür. Bu çam ağacına benzer yapı “*dendritik katılma yapısı*” olarak bilinir. Birincil dendrit kollar arası mesafe komşu iki dendrit uçları arasındaki mesafedir. İkincil dendrit kollar arası mesafe de ana dendrit gövdesine dik olarak yana doğru büyüyen ikincil kollar arasındaki mesafedir.

Dendritik katılma yapısında birincil kollardan çok daha fazla sayıda ikincil kollar mevcuttur (Şekil 2.12). Eğer katılaştırma tamamlanmışsa bütün dendritler bir çekirdekten tek bir tane biçiminde örülerek dendritik yapıyı oluşturur. Katılma yapısı bölgesel katılma hızına ve sıcaklık gradyanına göre değişmektedir. Bunun anlamı şudur; eğer uygulanan katılma hızı yeterince düşükse çözünen madde zamanla arayüzeyden sıvı içine itilir ve bunun neticesinde de arayüzey düzlemselleşeceği için katılma düzlemsel olur.



**Şekil 2.12** a) Kati ve sıvı fazlar arasında malzemenin katılaşma morfolojisi ve yumuşak bölge derinliği, b) Al-Cu alaşımında oluşan dendritlerin fotoğrafı (Voorhes, 2006)

Doğrusal katılaşmada dendritik yapı; birincil kollar arası mesafe  $\lambda_1$ , ikincil kollar arası mesafe  $\lambda_2$ , dendrit uç yarıçapı  $R$  ve yumuşak bölge derinliği  $d$ , alaşımın bileşimine, katılaşırma hızına ve sıcaklık gradyentine bağlı olarak değişmektedir. Bu özellik malzemeye yeni kullanım alanları kazandırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı bu konuda pek çok çalışma yapılmıştır.



## BÖLÜM III

### DENEYSEL SİSTEM VE BİR DENEYİN YAPILIŞI

#### 3.1 Giriş

Bu tez çalışmasında Ag katkılı Sn-ağ.% 8.8 Zn ötektik alaşımının doğrusal katılaştırılması, mikroyapı, mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinin araştırılması için gerekli olan tüm deney sistemleri ve deneylerin yapım aşamaları aşağıda detaylıca anlatılmıştır.

#### 3.2 Deneysel Sistem

Bu tez çalışmasında alaşımların üretilmesinde ve kontrollü katılaştırılmasında üç farklı fırın kullanılmıştır. Bu fırınlar; vakumlu eritme fırını, döküm fırını ve kontrollü katılaştırma fırınlarıdır.

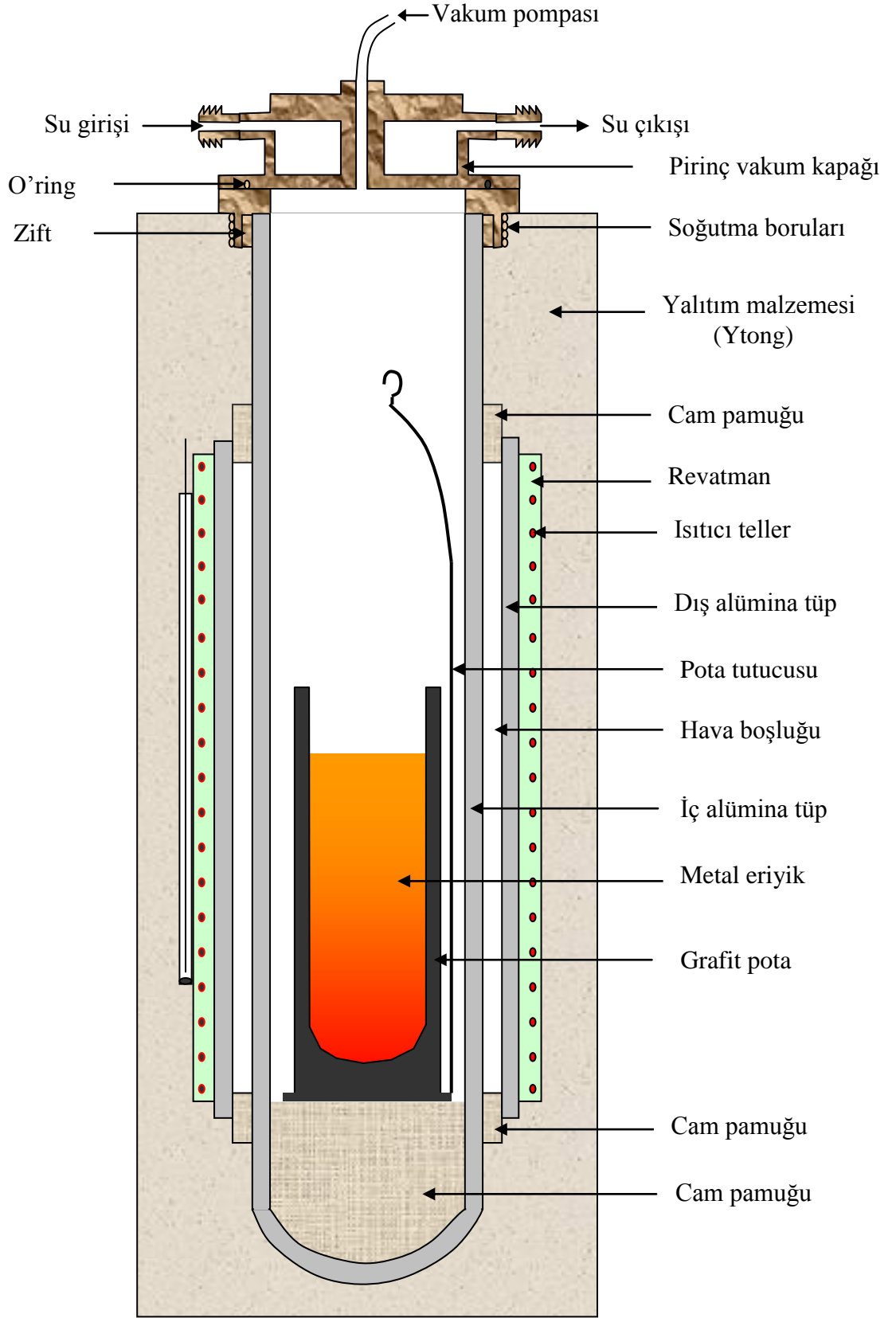
##### 3.2.1 Vakumlu eritme fırını

Bu fırın alaşım yapılacak metallerin vakumlu ortamda oksitlenmeden eritilmesinde kullanılır. Fotoğrafı Şekil 3.1'de, şematik gösterimi de Şekil 3.2'de verilen vakumlu eritme fırını, iç içe geçmiş iki alümina tüp, vakum pompası, sıcaklık kontrolcüsü, sabit güç vermekte kullanılan varyak ve soğutma sisteminden oluşmaktadır (Çadırılı vd., 2003).



**Şekil 3.1** Vakumlu eritme fırınının fotoğrafı

İçteki alümina tüpün iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 700 mm olup bir ucu kapalıdır. Bu alümina tüpün içinde vakumlu ortam sağlanır. Dış alümina tüpün ebatları ise 80 mm × 90 mm × 500 mm olup her iki ucu da açıktır. Dış alümina tüpün etrafına 1.2 mm kalınlığındaki Kanthal A1 telinden (FeCrAl alaşımından yapılmış tel) 80 sarım sarılmıştır. Isıtıcı telin toplam direnci 28.1  $\Omega$  olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde, tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Revatman ısındıkça sertleşen iyi bir yalıtım malzemesidir. Fırının ısı kaybını önlemek için alümina tüplerin etrafına gaz beton (Ytong) tuğlası yerleştirilmiştir. Vakumlu ortam oluşturabilmek için bir ucu kapalı alümina tüpün açık ucuna vakum pompasını bağlayacak şekilde pirinçten bir soğutma sistemi yapılmıştır. Vakumlama esnasında hava sızması için iç alümina tüp ile pirinç soğutma sisteminin arası zift ile yalıtılmıştır. Fırın ısıtıldığında ziftin erimemesi için ise soğutma sisteminden sürekli su dolandırılmaktadır. Fırının sıcaklığı sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmektedir. Vakumlu eritme fırını 1100 °C'ye kadar ( $\pm 2$  °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. Eritme işlemi vakum pompası yardımıyla  $10^{-3}$  mbar basınç altında yapılmaktadır.



Şekil 3.2 Vakumlu eritme fırınının şematik gösterimi (Çadırlı vd., 2003)

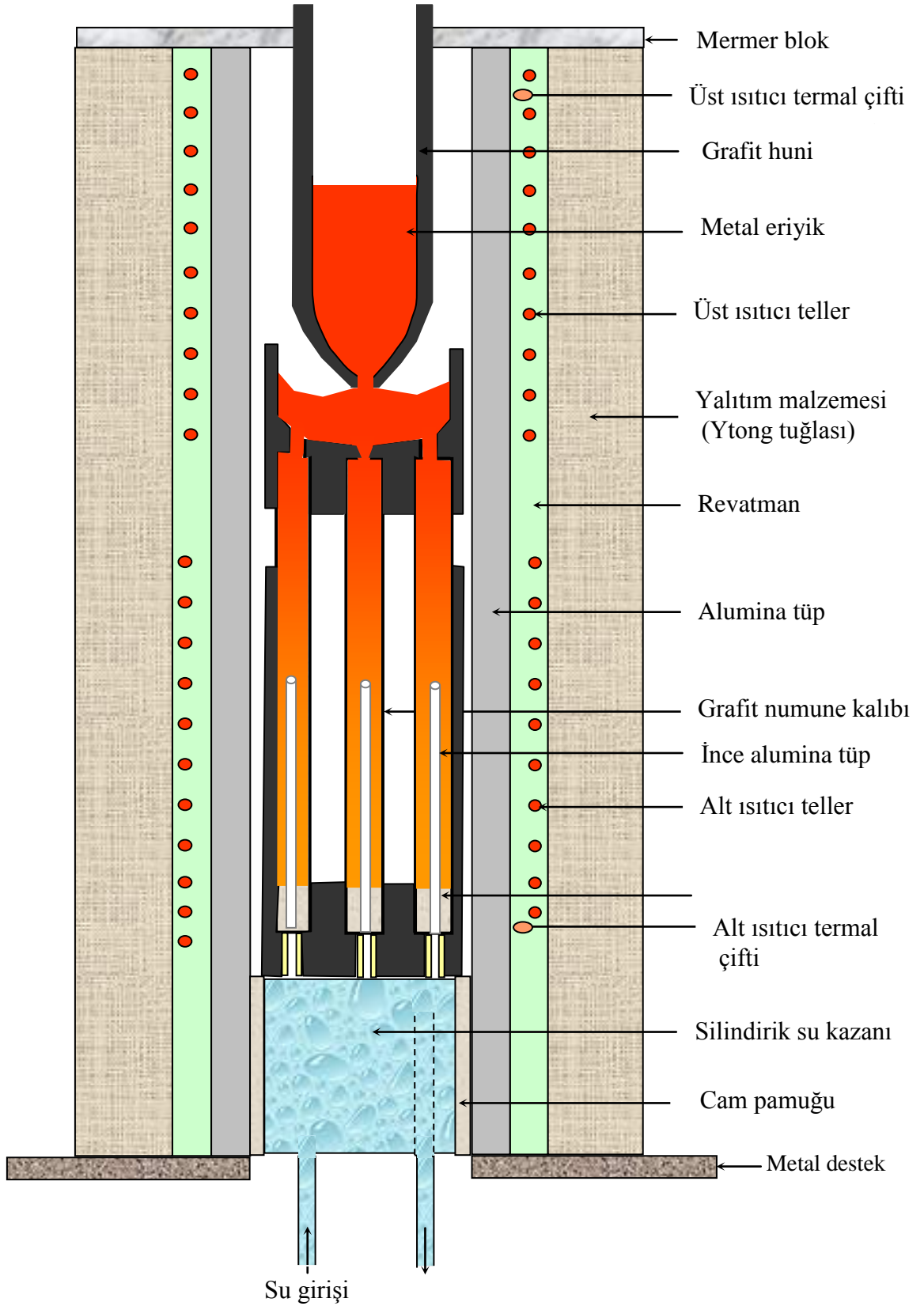
### 3.2.2. Döküm fırını

Döküm fırını, eriyik haldeki alaşımın özel numune kalıbı içerisine dökümünün yapılması ve alaşımın kalıp içerisinde tek yönlü (doğrusal) olarak katılaştırılması için kullanılmaktadır. Dökümü yapılan numuneler içerisinde hava boşluğunun kalmaması ve numunelerin tamamen dolması için tek yönlü katılaştırma amacıyla kullanılan döküm fırınının fotoğrafı Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Döküm fırınının fotoğrafı

Döküm fırını; iki ucu açık alümina tüp, alt ısıtıcı, üst ısıtıcı ve soğutma kazanından oluşmaktadır. İç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 750 mm olan alümina tüpün etrafındaki farklı iki bölgeye ısıtıcı teller sarılarak birbirinden bağımsız iki ısıtıcı bölge oluşturulmuştur. Isıtıcı tel olarak 1.2 mm kalınlığında Kanthal A1 teli kullanılmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların dirençleri sırasıyla 16.675  $\Omega$  ve 9.725  $\Omega$  olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların sıcaklıklarını ölçmek için ısıtıcıya yakın mesafelere iki adet yalıtılmış K-tipi termal çift yerleştirilmiştir. Alümina tüpün alt tarafına 40 mm çapında ve 160 mm uzunluğunda silindirik bir su kazanı yerleştirilmiştir. Alümina tüpün etrafı ise ısı yalıtımı amacıyla gaz beton (Ytong) tuğlası ile kaplanmıştır. Döküm fırını 1100 °C’ye kadar ( $\pm 2$  °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. Döküm fırınının şematik gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 Döküm fırınının şematik gösterimi (Gündüz vd., 2004)

### 3.2.3. Kontrollü katılaştırma fırını

Vakum eritme fırını ve döküm fırını kullanılarak üretilen alaşımların farklı katılaştırma şartlarında tek yönlü doğrusal katılaştırılması bu fırında yapılmaktadır.

Şekil 3.5’de şematik olarak gösterilen kontrollü katılaştırma fırınında, değişik katılma hızları elde etmek için kullanılan motor bağlantılı bir sürücü sistem, farklı sıcaklık gradyenti oluşturmak için kullanılan ısıtıcı ve soğutucu sistemler bulunmaktadır. Bu fırında numune tutucusuna yerleştirilen numuneler, sürücü sistem vasıtasıyla sıcak bölgeden soğuk bölgeye çekilirken, kalıp içerisindeki sıvı alaşım, en alt kısımdan başlayarak katılaşmakta ve katı-sıvı arayüzeyi yukarı yönde ilerlemektedir.

Kontrollü katılaştırma fırını 1100 °C sıcaklığa kadar çıkılabilmektedir. Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırını başlıca ısıtıcı sistem, soğutucu sistem ve sürücü sistem olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır.

#### 3.2.3.1. Isıtıcı sistem

Isıtıcı sistem, yüksek sıcaklıklara dayanıklı iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm, uzunluğu 800 mm olan iki ucu açık alümina tüp etrafına 1 mm çapında, toplam direnci 25  $\Omega$  olan Cr-Ni tel 300 mm sarılarak yapılmıştır. Alümina tüpün iki ucuna pirinçten yapılmış dairesel kesitli kaideler geçirilmiştir. Alümina tüp ile pirinç kaideler arasındaki boşluk 180 °C’ye dayanıklı zift (black wax) ile doldurulmuş ve böylece numunenin argon atmosferinde kalması sağlanmıştır. Dolgu ziftinin aşırı ısınmasını önlemek ve pirinç kaideyi soğuk tutmak için kaidelerin içerisinden sürekli su dolanımı yapılmıştır. Fırının sıcaklığını kontrol etmek için 0.5 mm çapında yalıtılmış, metal kaplı K-tipi termal çift sıcak bölgenin tam ortasına yerleştirilmiştir. Ayrıca üst bölgede pirinç kapak ile pirinç kaide arasından hava sızmaması için lastik halka (O’ring) yerleştirilmiştir. Kontrollü katılaştırma fırınının ısıtıcı sistemi  $\pm 0.1$  °C hassasiyetinde **2604S Eurotherm** sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmiştir.

#### 3.2.3.2. Soğutucu sistem

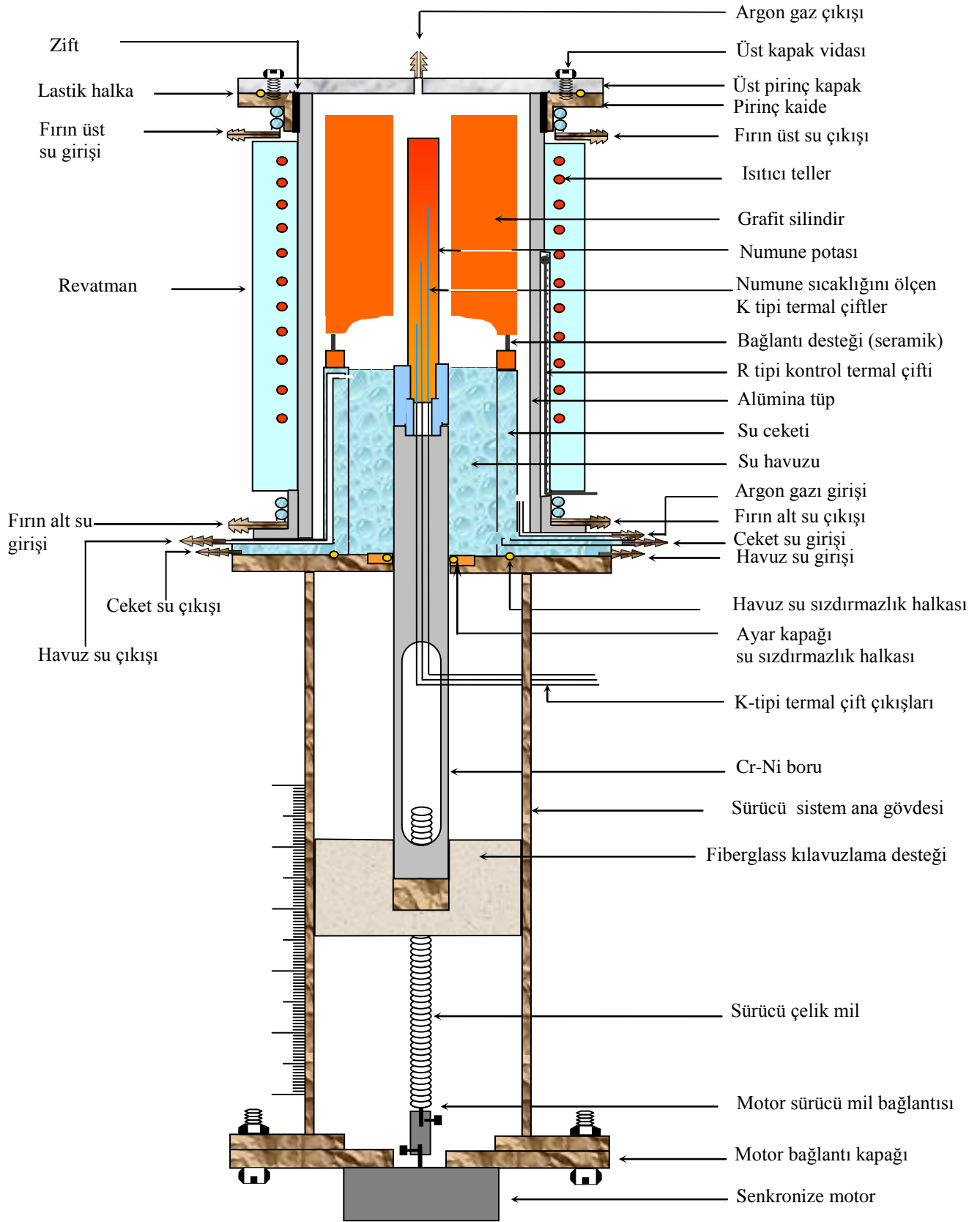
Soğutma sistemi, fırın içerisinde sıcaklık gradyenti oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. Yeterli uzunlukta katılaştırılan numune, aniden soğutma bölgesine (iç su havuzuna)

çekilerek ani soğutma (quench) sağlanmaktadır. Soğutucu sistem, 300 mm uzunluğunda 23 ve 33 mm çaplara sahip iç içe geçmiş iki pirinç borudan oluşmaktadır. Pirinç boruların alt kısmı yaklaşık 10 mm kalınlığında, 100 mm çapında dairesel pirinç parçaya kaynatılmıştır. Sistem su ile soğutulmaktadır. Soğutma su ile yapıldığından sürekli soğutma için iki tane su girişi, iki tanede su çıkışı vardır. Su giriş ve çıkış delikleri alttaki pirinç kaideye suyun girip çıkabileceği kanallar açılarak oluşturulmuştur ve hortumların bağlanabilmesi için de bu deliklere içi boş olan pirinç parçalar kaynatılmıştır. İç içe geçmiş pirinç borular arasında bir su ceketini ve içteki boruda ise asıl numuneyi soğutacak su seviye kontrollü su havuzu bulunmaktadır. Numune aşağıya çekildikçe su seviyesinde değişme olmaması için iç borudan dışa su yolu yapılmıştır. Su ceketinin yapılmasındaki amaç numuneyi soğutan suyun sıcaklığının sabit tutulması ve ani katılaştırmayı sağlaması içindir.

### **3.2.3.3. Sürücü sistem**

Farklı katılaştırma hızları elde etmek amacı ile kullanılan sürücü sistem, 540 mm boyunda ve 40 mm çapında pirinç gövde içerisinde bulunan, dış çapı 12 mm, iç çapı 10 mm, uzunluğu 650 mm olan Cr-Ni borudan oluşmaktadır. Üzerinde cetvel ölçeği bulunan sürücü sistemin alt kısmında, değişik katılaştırma hızları sağlayan sürücü miline bağlı senkronize motor bulunmaktadır. Pirinç gövde içerisindeki Cr-Ni boru, alt ucundan fiberglastan yapılmış mil yuvasına, üst ucundan da numune tutucusuna sabitleştirilmiştir. Cr-Ni borunun kenarlarından su sızıntılarını önlemek amacıyla lastik halkalar kullanılmıştır. Pirinç gövde içerisine yerleştirilmiş fiberglas, 65 mm uzunluğundadır. Fiberglas'ın bir ucu 12 mm çapındaki Cr-Ni boruya sıkı bir şekilde geçebilmesi için delinmiştir.

Diğer ucuna ise sürücü milin içinde hareket edebilmesi için 20 mm çapında 30 mm uzunluğunda pirinç blok yerleştirilmiştir. Bu parçanın merkezine 3 mm çapında metrik diş açılmıştır. Sürücü mil çelikten yapılmış olup buna da 3 mm'lik metrik diş açılmıştır. Numune bu çelik mil vasıtasıyla motor devir hızına bağlı olarak, soğuk bölgeye doğru çekilip, düşey doğrultuda kontrollü olarak katılması sağlanmaktadır.



Şekil 3.5 Kontrollü katılaştırma fırınının şematik gösterimi (Çadırlı vd., 2007)



### 3.3. Bir Deneyin Yapılışı

Bir kontrollü katılaştırma deneyi; numune hazırlama, kontrollü katılaştırma, metalografik işlemler ve mikroyapıların açığa çıkarılması basamaklarından oluşmaktadır.

#### 3.3.1 Numune hazırlama

##### 3.3.1.1 Alaşım hazırlama

Sn-ağ.% 8.8 Zn, Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag, Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımlarını hazırlamarken ilk olarak alaşımı oluşturan elementlerin kütlece oranlarını belirlemek için stokiyometrik hesaplamalar yapıldı. Çizelge 3.1'de bu alaşımları oluşturan metallere ait miktarlar verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Alaşımları hazırlamak için gerekli metal miktarları

| V=20 cm <sup>3</sup> | Kütle (g) |        |       |
|----------------------|-----------|--------|-------|
|                      | Sn        | Zn     | Ag    |
| Alaşım (ağ.%)        |           |        |       |
| Sn-8.8 Zn            | 133.052   | 12.827 | –     |
| Sn-8.8 Zn-1.0 Ag     | 131.974   | 12.867 | 1.541 |
| Sn-8.8 Zn-3.0 Ag     | 129.859   | 12.956 | 4.414 |

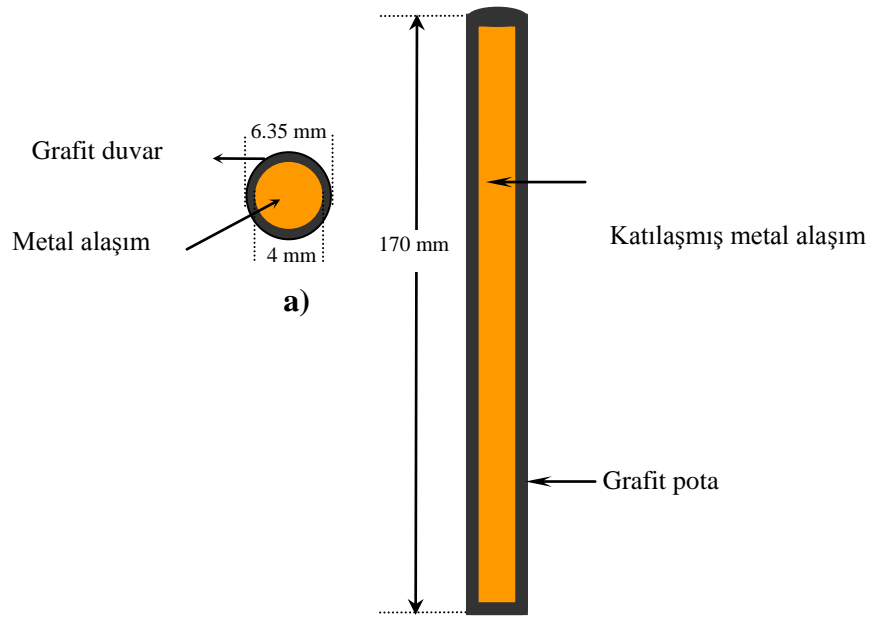
##### 3.3.1.2 Numune kalıbının ve potasının yapılması

Numune kalıplarını hazırlamak için yaklaşık 170 mm uzunluğundaki grafitler dış çapı 6.35 mm, iç çapı 4 mm olacak şekilde fotoğrafı Şekil 3.6'da görülen Optimum marka tornada delinerek hazırlandı. Grafit numune kalıbının şematik gösterimi Şekil 3.7'de verilmiştir.

Grafitleri alaşım ile doldurmak için numune potaları kalıbına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3.8'de verildiği gibi hazırlanan numune kalıplarından 13 adet numune elde edilebilmektedir. Numune potası, alt ve üst olmak üzere 2 adet grafit destekten oluşmaktadır. Alt destek 40 mm çapında, 250 mm uzunluğunda silindirik biçimli grafit parçadan yapılmış ve içerisine 30 mm çaplı 200 mm uzunluğunda bir ucu kapalı kalacak şekilde delik açılmıştır.

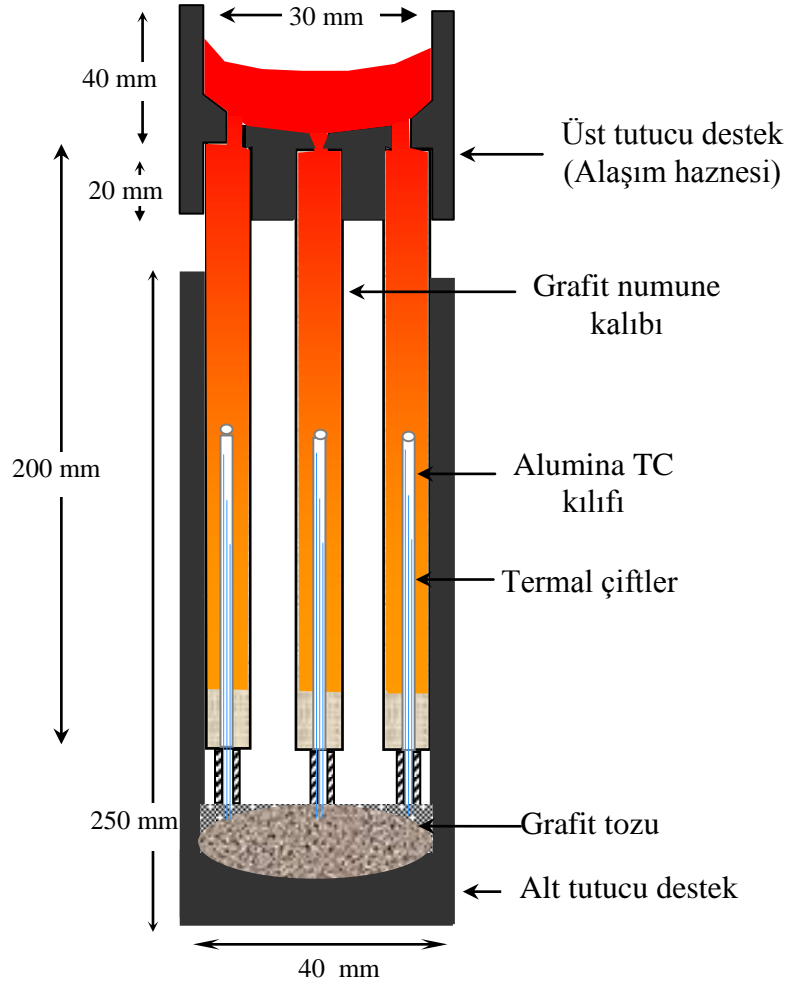


Şekil 3.6 Numune kalıplarının hazırlanmasında kullanılan tornanın fotoğrafı

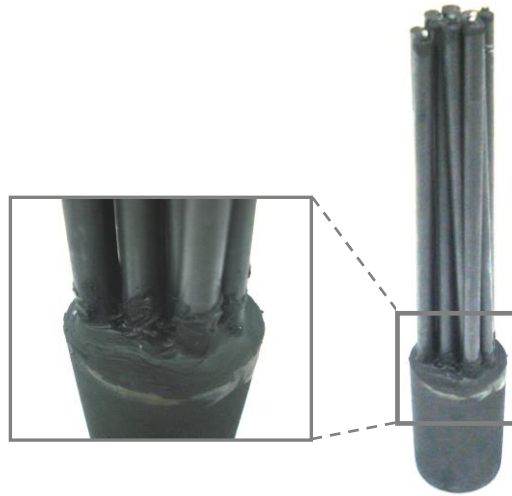


Şekil 3.7 Grafite numune kalıbının şematik gösterimi

Üst destek yapımı için 60 mm uzunluğunda, 40 mm çapında bir grafit parça kullanılmıştır. Grafit parçanın bir ucu 30 mm çapında matkap ucu kullanılarak 40 mm uzunluğunda delinmiştir. Diğer ucuna ise 3 mm çapında 20 mm uzunluğunda 13 adet delik açılmıştır. Bu delikler 6.35 mm çapındaki matkap ucuyla 15 mm uzunluğunda genişletilmiştir. Önceden hazırlanmış olan numune kalıplarının açık uçları üst destekteki deliklerden geçirilmiştir. Birleşme noktaları 1200 °C'ye dayanıklı karbon katkılı silikon yapıştırıcı ile tutturulmuştur (Şekil 3.9). Üst destek ile numune kalıpları arasında sürülen silikonların kuruması için yaklaşık bir gün süreyle beklenmiştir. Daha sonra önceden hazırlanan alt destek yardımıyla kılavuzlama yapılmıştır. Hazırlanan kalıp döküm fırınına teller yardımıyla indirilmiş böylece kalıp hazırlama işlemleri tamamlanarak alaşım üretilmesi basamağına geçilmiştir.



Şekil 3.8 Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi



Şekil 3.9 Üst destek ile numune kalıplarının silikon yapıştırıcı yardımıyla birleştirilmesi

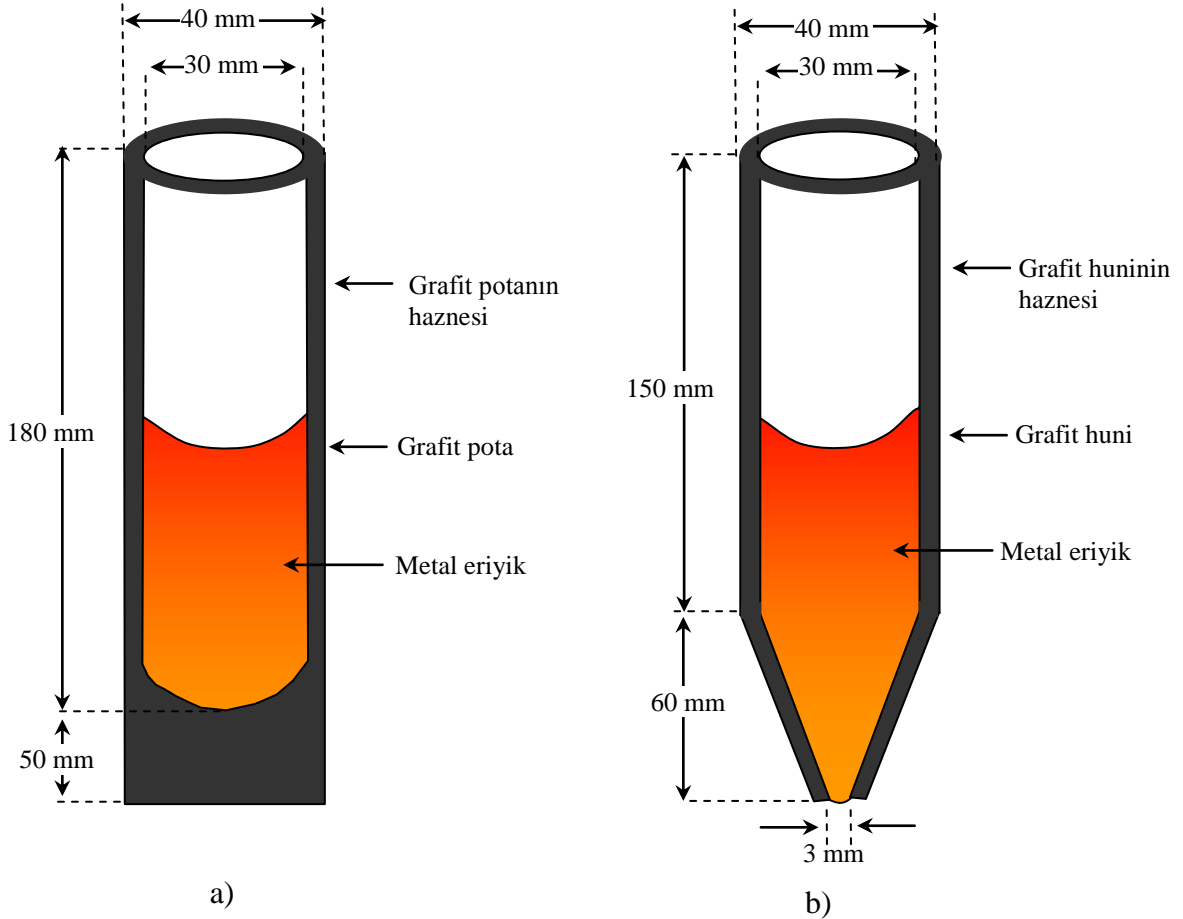
### 3.3.1.3 Alaşımın üretilmesi ve dökümünün yapılması

Alaşım hazırlamada kullanılacak metallerin miktarları hassas terazi ile tartıldıktan sonra alaşımın hazırlanması ve hazırlanan alaşımın numune kalıplarına doldurulması aşamalarına geçildi. Erime sıcaklığı düşük olan metal altta kalacak şekilde metal malzemeler grafit potaya yerleştirildi. Grafit pota uygun bir çengelli tel pota tutucusu yardımıyla vakum fırınına indirildi. Vakum pompası çalıştırılarak fırın vakumlandı. Fırın ısıtılmaya başlamadan önce fırının kapaklarında bulunan ziftin sıcaklığın etkisiyle erimemesi için kapak içlerinden su geçirilerek soğutma yapıldı. Varyak en düşük güç durumunda çalıştırıldı ve yaklaşık her 5 dakikada varyağın değeri %5 artırıldı. Varyağın değerinin artırılmasına fırın istenilen sıcaklığa çıkıncaya kadar devam edildi. Metaller tamamen eridikten sonra vakum kapağı açılarak grafit karıştırıcı çubuk yardımıyla metal eriyik birkaç kez karıştırıldı. Böylece eriyik halde metalik ikili ve üçlü alaşımlar hazırlanmış oldu.

Vakumlu eritme fırınında alaşım hazırlama işlemleri devam ederken diğer taraftan döküm fırınında dökümün yapılması ve önceden yapılan numune kalıplarına alaşımın doldurulması hazırlıklarına başlandı. Numune potalarıyla desteklenen numune kalıplarının etrafı cam pamuğu ile sarılarak çevresine sarılan tel yardımıyla fırına indirildi. Dökümü kolaylaştırmak amacıyla kalıp üzerine grafitten yapılmış bir huni yerleştirildi. Döküm sırasında sıvı alaşımın dışarıya taşıp fırına sızmasını engellemek için grafit huni ile alümina tüp arasına yüksek sıcaklığa dayanıklı cam pamuğu sıkıştırıldı. Fırının alt ve üst ısıtıcılarına güç verilerek fırının iç bölgesinin ısıyı çekmesi beklendi. Döküm fırınında varyakları yavaş yavaş artırılarak alt ısıtıcının sıcaklığı alaşımın erime sıcaklığının yaklaşık 50 °C üzerindeki bir sıcaklığa, üst ısıtıcının ise erime sıcaklığının 100-150 °C üzerindeki bir sıcaklığa çıkması sağlandı. Burada amaç vakumlu eritme fırınından eriyik halde çıkarılan alaşımın döküm fırınına yerleştirilen numune kalıplarına dolması esnasında akışkanlığını koruması ve bu süreç esnasında katılaşmadan kalıp içlerine tam bir dolum yapmasıdır.

Vakumlu eritme fırınında hazırlanan ve yeterli miktarda karıştırılarak homojen hale getirilen eriyik, maşa ile vakit geçirilmeden huni yardımıyla numune kalıplarına döküldü. Şekil 3.10a'da vakumlu eritme fırınında alaşımı oluşturacak metalleri içerisinde eritmede kullanılan grafit pota ve Şekil 3.10b'de döküm fırınında döküm yapmak amacıyla kullanılan grafit huninin şematik gösterimi verilmiştir.

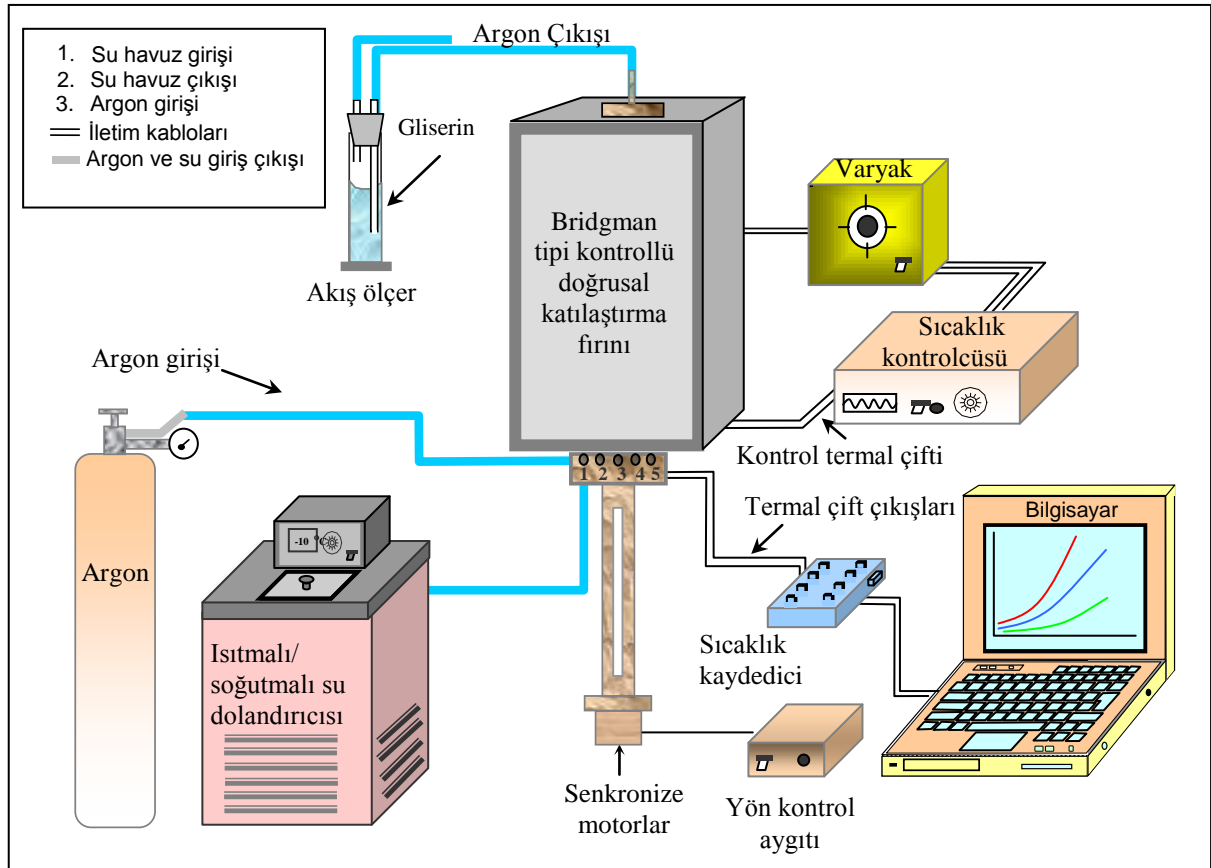
Grafit numune potası üzerine yerleştirilen huni çıkarıldı ve ince bir grafit çubuk ucuna bağlanan alümina tüp ile sıvı alaşım tekrar tekrar karıştırılarak numune kalıpları içerisinde bulunabilecek hava kabarcıklarının dışarıya çıkması sağlandı. Döküm fırınının alt ısıtıcısı kapatıldı, üst ısıtıcı çalışır haldeyken numune kalıbının altında bulunan soğutma kazanından su geçirilerek tek yönlü katılaştırma başlatıldı. Tek yönlü katılaştırmanın amacı numune kalıbının içerisinde hava boşluğu kalmaksızın tamamen doldurulmasıdır. Katılaşma tamamlandıktan sonra üst ısıtıcı da kapatılarak fırının soğuması beklendi. Fırın tamamen soğuduktan sonra, dökümü yapılan grafit numune kalıpları fırından çıkarıldı. Alaşım ile doldurulan 4 mm iç çaplı grafitler numune kalıplarından çıkartıldı. Böylece bu döküm aşamasından sonra numuneler kontrollü katılaştırılmaya hazır hale getirilmiş oldu.



Şekil 3.10 Grafitten yapılmış a) pota ve b) huninin şematik gösterimi

### 3.3.2 Kontrollü katılaştırma

Bu tezde çalışılan alaşımlar sabit fırın sıcaklığında farklı katılaştırma hızlarında yukarı yönde doğrusal katılaştırıldı. Doğrusal katılaştırma deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.11’de, fotoğrafı da Şekil 3.12’de verilmiştir.

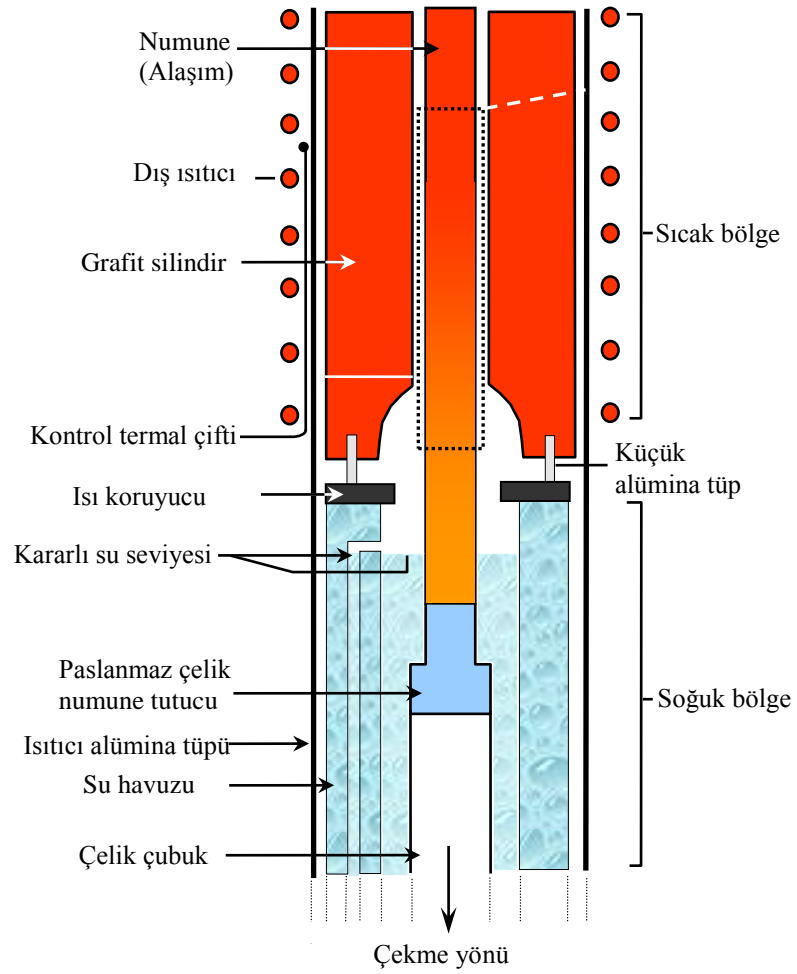


Şekil 3.11 Deney sisteminin şematik gösterimi

Numuneyi doğrusal katılaştırmak için numunemiz numune tutucusuna tutturuldu (Şekil 2.13). Daha sonra numunemiz fırının sıcak bölgesine yerleştirildi. Fırının istenilen sıcaklığa (erime sıcaklığının üzerindeki sıcaklığa) ulaşması için sıcaklık kontrolcüsü istenilen sıcaklığa set edildi ve fırın oda sıcaklığından itibaren ısıtılmaya başlandı. Fırının istenilen sıcaklığa ulaşması için de varyak kademeli olarak arttırıldı. İstenilen sıcaklığa ulaşıncaya yaklaşık 20 dakika bu sıcaklıkta fırının termal dengeye gelmesi için beklendi. Fırın dengeye geldikten sonra senkronize motor ile numune fırının sıcak bölgesinden soğuk bölgesine doğru çekilmeye başlandı. Numunemiz 14-15 cm katılaştıktan sonra suya quench edildi. Daha sonra numune fırından çıkartıldıktan sonra içerisinde bulunduğu grafit potadan da çıkartıldı.



Şekil 3.12 Deney sisteminin fotoğrafı



Şekil 3.13 Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınının iç yapısı



**Şekil 3.14** Senkronize motorlar

Alaşımları farklı katılaştırma hızlarında katılaştırmak için de fotoğrafı Şekil 3.14’de verilen farklı dönme hızlarına sahip senkronize motorlar kullanıldı.

### **3.3.3 Metalografik işlemler**

Grafit potalardan çıkartılan numunelerin arayüzeylerinin yerini tespit etmek için, kaba zımparalama ve parlatma yapıp uygun dağlayıcı ile dağlandı. Daha sonra arayüze en yakın katı ve sıvı bölgelerden parçalar kesildi. Enine ve boyuna kesitleri alınan numuneler soğuk kalıplama yöntemi kullanılarak epoksi-resin ile kalıplandı. Bu işlemde 7 birim resin 1 birim serleştirici kullanılarak 1 gün bekletildi. Epoksi-resin ile kalıplanan numunelerin fotoğrafı Şekil 3.15’de verilmektedir. Epoksi-resin ile kalıplanan alaşımların mikroyapılarını açığa çıkarmak için zımparalama, parlatma ve dağlama gibi bir takım metalografik işlemler yapıldı.

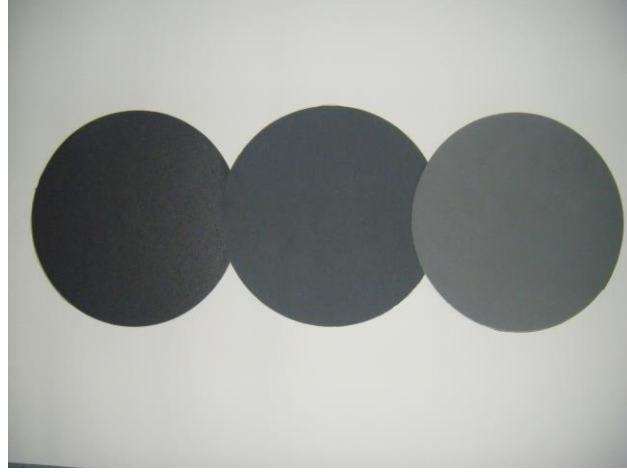


**Şekil 3.15** Epoksi-resin ile kalıplanan numuneler



### 3.3.3.1 Numunelerin zımparalanması

Numunelerin zımparalanması silisyum karbür (SiC) taneleri ve magnetit tozu içeren zımpara kağıtlarıyla yapıldı. Numuneler 320 gridlik zımpara kağıdından başlanarak, 500, 1200, 2400 ve 4000 gride kadar kabadan inceye doğru kademeli olarak zımparalandı. Numunelerin zımparalanmasında kullanılan bazı zımpara kağıtlarının fotoğrafı Şekil 3.16 verilmektedir.



Şekil 3.16 Numuneleri zımparalamada kullanılan bazı zımpara kağıtları



Şekil 3.17 Otomatik parlatma cihazının fotoğrafı

Numunelerin zımparalanmasında ve parlatılmasında kullanılan Struers Labopol-5 marka otomatik parlatma cihazının fotoğrafı Şekil 3.17’de verilmektedir. Numuneler zımparalanırken cihazın su modu açılarak numunelere sulu zımparalama yapıldı.

### 3.3.3.2 Numunelerin parlatılması

Numuneleri parlatmak için, dönüş hızı ve basınç değeri ayarlanabilen parlatma cihazının disklerine uygun parlatma kumaşları yerleştirdi. Parlatma için, fotoğrafı Şekil 3.18’de görülen farklı tane büyüklüğüne sahip elmas süspansiyonlar kullanıldı. Parlatma işleminde kullanılan elmas süspansiyonlar sırasıyla alümina pasta, 3 µm, 0.25 µm tane büyüklüğüne sahip süspansiyonlardır. Parlatma sırasında her bir elmas süspansiyon için ayrı metal diskler üzerine yapıştırılmış parlatma kumaşları kullanıldı. Numune ile parlatma kumaşı arasında yumuşak bir temas sağlamak ve nem miktarını ayarlamak amacıyla parlatıcı ile birlikte yağlayıcı kullanıldı. Numunelerin parlatılmasında kullanılan parlatma kumaşlarının fotoğrafı Şekil 3.19’da verilmektedir.



Şekil 3.18 Parlatmada kullanılan elmas süspansiyonlar



Şekil 3.19 Parlatma kumaşları

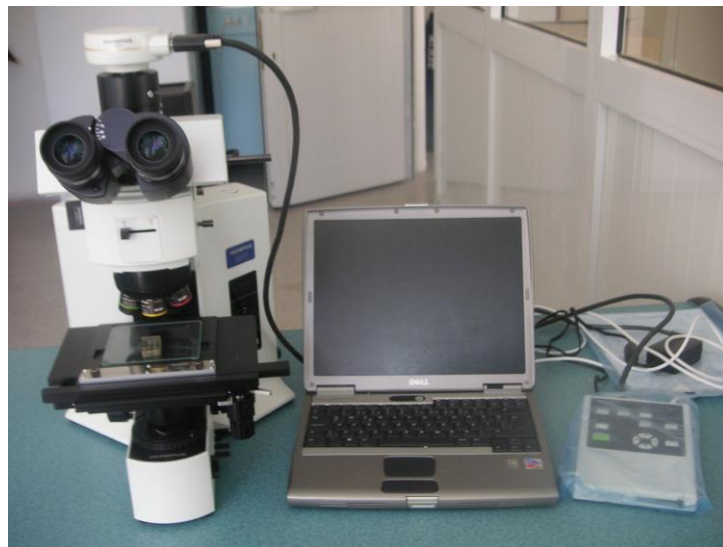
### 3.3.3.3 Numunelerin dağlanması

Parlatılmış numunelere mikroskopta bakıldığında, yapıları hakkında bilgi sahibi olmak zordur. Parlatılmış numunenin yzeyi ışığı eşit bir şekilde dağıttığından yapıdaki ayrıntılar ayırt edilemez. Bu nedenle yapıda kontrast oluşturulması gerekir. Bunun için uygulanan yznteme dağlama denilmektedir. Malzemelerde iç yapı ozelliklerini ortaya çıkarmak için metalografide çoğu kez parlatılmış numune yzeyine uygun bir reaktif uygulanır. Bu işleme kimyasal dağlama denilmektedir. Parlatma işlemi tamamlanan numunelerin mikroyapılarının optik mikroskopta açığa çıkarılması için % 92  $CH_3OH$ , % 5  $HNO_3$  ve % 3  $HCl$  ile dağlandı.

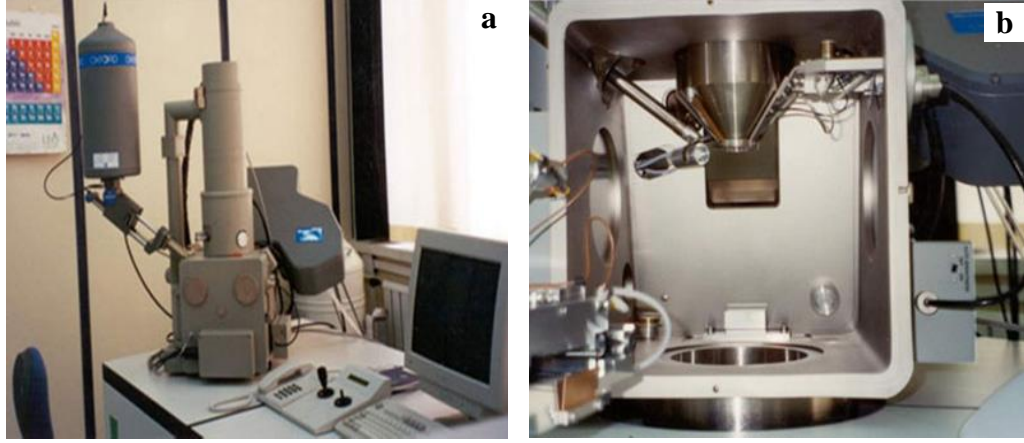
### 3.3.4 Mikroyapılarının gzlenmesi

Dağlama işlemleri tamamlanan numunelerin enine ve boyuna kesitlerinden elde edilen fotoğraflar, şekil 3.20'de gzrzen Olympus BX-51 marka optik mikroskop ile farklı objektifler (x5, x10, x20, x50, x100) kullanılarak çekildi.

Ayrıca alaşımların fotoğrafları LEO 440 marka bilgisayar kontrollz dijital taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) ekildi. Bu mikroskop, 40 kV hızlandırma voltajlı ve Secondary - Backscattered elektron detektzrune sahip  $\times(5-300\ 000)$  kat bzyzme kapasitelidir. şekil 3.21'de, kullanılan SEM mikroskobunun fotoğrafı verilmektedir.



şekil 3.20 Optik mikroskopun fotoğrafı



**Şekil 3.21** Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) fotoğrafı a) dıştan görünüş b) içten görünüşü

### 3.4 Mikrosertlik Ölçümü

Mikrosertlik ölçümleri; fotoğrafı Şekil 3.22’de verilen *Future Tech FM-700* model dijital mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapıldı. Bu cihaz 1 gr, 5 gr, 10 gr, 50 gr, 100 gr, 300 gr, 500 gr, 1000 gr yük uygulayabilme % 5 hassasiyette ölçüm alabilme, elektronik olarak sertlik değerini kendisi hesaplayabilme özelliklerine sahiptir. Farklı katılaştırma şartlarında kontrolü katılaştırılan numuneler sırasıyla test cihazına bağlanarak enine, boyuna bölgelerinden çok sayıda ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.



**Şekil 3.22** Mikrosertlik test cihazının fotoğrafı (Çadırlı, 2006)

Vickers sertlik ölçümünde kullanılan batıcı uç (indenter), yüzeyleri arasında 136 ° açı bulunan bir elmas piramittir. Darbelere karşı daha hassas olduğundan en sert malzemeler bile bu metotla ölçülebilir. Batıcı uç numuneye belirli bir süre zarfında uygulanarak, numunede kare şeklinde iz oluşturulmaktadır. İzin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak alan belirlenir.

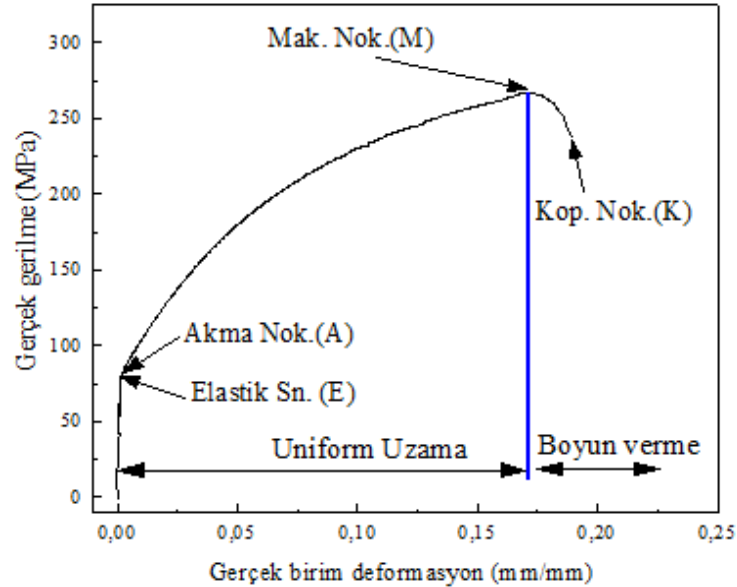
Vickers mikrosertliği (HV), uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile belirlenir.

$$HV = \frac{2P \sin(\theta/2)}{d^2} \quad (3.1)$$

P uygulanan yük (kg), d izin köşegen uzunluğu ( $d^2=d_1d_2$ ),  $\theta$  ise köşegen izinin zıt yüzeyleri arasındaki açıdır.

### 3.5 Maksimum Çekme Gerilme Dayanımı Ölçümü

Çekme dayanımı, mühendislik gerilme-gerinme grafiğinde ulaşılan en yüksek noktadır. Mühendislik gerilmesi numunenin başlangıç kesitini temel aldığından; eğer numune kesitinde bölgesel bir daralma oluyorsa (boyun verme) kopmaya kadar gerinme arttıkça mühendislik gerilmesi küçülecektir (Şekil 3.23).



Numunelerin çekme dayanım testleri oda sıcaklığında 1 mm/dak deformasyon hızında **Shimadzu AG-XD 50 kN** mekanik çekme cihazında gerçekleştirildi. Cihazın fotoğrafı Şekil 3.24’da verilmiştir.

Çekme dayanımı  $\sigma$  (N/mm<sup>2</sup> veya MPa),

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada,  $F$  çekme kuvveti,  $A$  ise malzemenin deformasyona uğramadan önceki kesit alanıdır. Deformasyon (uzama) miktarı  $\varepsilon$ ,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3.3)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada,  $\Delta L$  anlık alınan deformasyon miktarı,  $L_0$  ise başlangıç uzunluğudur.

Çekme dayanım testleri için farklı katılaştırma şartlarında kontrollü katılaştırılmış yaklaşık 40 mm uzunluğunda, 4 mm çaplı dairesel kesite sahip numuneler kullanıldı. Çekme dayanımı yapılan alaşımların gerilme-uzama eğrilerinden elde edilen en yüksek gerilme dayanımının, katılaştırma hızına bağımlılığı belirlendi.

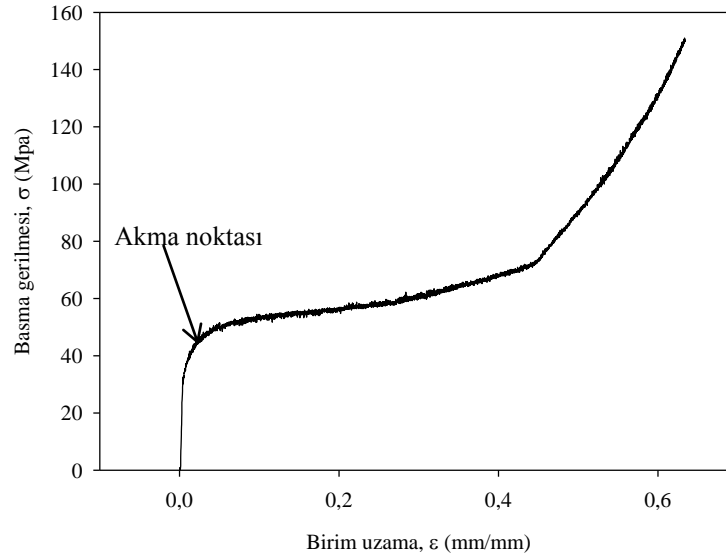


Şekil 3.24 Çekme dayanımı deney sisteminin fotoğrafı

### 3.6 Basma Akma Dayanımı Ölçümü

Basma deneyi, çekme basma makinelerinde basma kuvveti uygulamak sureti ile yapılır. Basma deneyinde homojen bir gerilim dağılımı sağlamak amacıyla yuvarlak kesitli numuneler tercih edilir. Basma deneyi numunelerinde, numune yüksekliği ( $h_0$ ) ile çapı ( $d_0$ ) arasındaki  $h_0/d_0$  oranı çok önemlidir. Numunenin  $h_0/d_0$  oranının çok büyük olması, deney sırasında numunenin bükülmesine ve homojen olmayan gerilim dağılımına sebep olur. Bu oran küçüldükçe numune ile basma plakaları arasında meydana gelen sürtünme deney sonuçlarını çok fazla etkilemektedir. Bu sebeple numunenin  $h_0/d_0$  oranının metalik malzemeler için  $1.5 \leq h_0/d_0 \leq 2$  aralığında olması önerilir.

Malzemenin plastik deformasyonun başladığı noktadaki gerilme değerine akma dayanımı denir (Şekil 3.25). Çalışılan alaşımlar sert malzemeler olmadığından dolayı, basma teslerinden sadece akma dayanımı ölçümleri yapılabildi. Bu ölçümler için 4 mm çapa ve 6-8 mm uzunluğa sahip numuneler kullanıldı.



Şekil 3.25 Basma gerilmesi-birim uzama eğrisi

### 3.7 Elektriksel Ölçümler

#### 3.7.1 Özdirenç ölçümleri

Alaşımın elektriksel özdirenç ölçümleri dört nokta (four point probe) yöntemi (Smiths, 1958) ile yapılmıştır. Malzemelerin elektriksel ölçümlerinde dört nokta yöntemi (Smiths, 1958) çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde numune yüzeyinde dört noktadan kontak yapılır. Dıştaki kontaklar akım kaynağında içerideki kontaklar da voltaj ölçümünde kullanılır (Şekil 3.26). Dört nokta yönteminin (Smiths, 1958) kullanılmasıyla metal uç (prob) ve malzeme arasındaki kontak direnci ve diğer prob ve uç (prob) yayılma direnci gibi dirençler elimine edilir.

Aşağıda verilen denklemler vasıtasıyla numunenin elektriksel özdirencini hesaplanabilir. Numune direnci  $\Delta R$ ,

$$\Delta R = \rho \left( \frac{dx}{A} \right) \quad (3.4)$$

eşitliği ile verilir. Burada,  $A$  numunenin enine kesit alanı,  $dx$  küçük bir uzunluktur. Gerilimin uygulandığı içteki prob uç konumlarından integral alınır,

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\rho}{2\pi x^2} dx = \frac{\rho}{4\pi s} \quad (3.5)$$

eşitliği elde edilir. Burada,  $x$  en dıştaki prob ucundan olan mesafedir. Dış uçlardaki akımın süperpozisyonuna bağlı olarak direnç,

$$R = \frac{V}{2I} \quad (3.6)$$

eşitliği ile verilir. Numunenin özdirenci de,

$$\rho = 2\pi s \left( \frac{V}{I} \right) \quad (3.7)$$

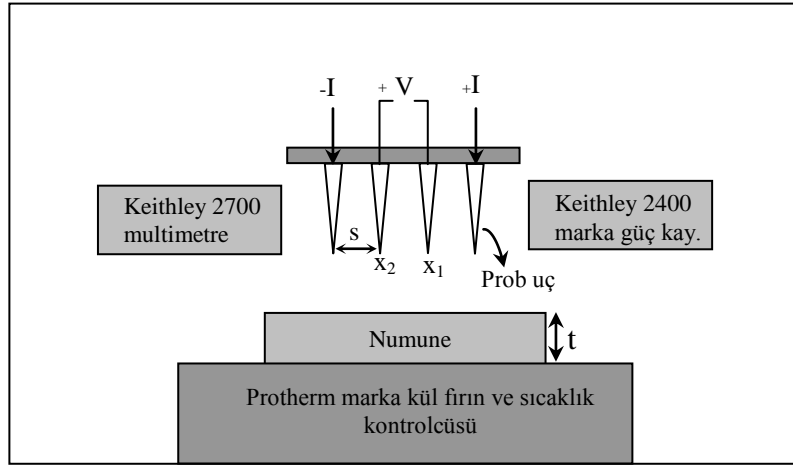
eşitliği ile verilir. Burada,  $2\pi s$  özdirenç düzeltme faktörü,  $V$  içteki problemler arasındaki potansiyel fark,  $I$  'da numuneden geçen akımdır.



Özdirençin sıcaklık katsayısı  $\alpha$  , özdirenç-sıcaklık grafiğinin eğiminden hesaplanır ve,

$$\alpha = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0(T - T_0)} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (3.8)$$

eşitliği ile verilir. Burada,  $\rho_s$ ,  $T$  sıcaklığındaki özdirenç,  $\rho_0$  ise oda sıcaklığındaki ( $T_0 = 300K$ ) özdirençtir.



**Şekil 3.26** Elektriksel özdirenç ölçümlerinde kullanılan dört nokta yönteminin şematik gösterimi (Smiths, 1958)



**Şekil 3.27** Elektriksel özdirenç ölçüm deney düzeneği.

### 3.7.2 Isıl iletkenlik hesabı

Isıl iletkenlik malzemenin ısı iletim kabiliyetini anlatan bir özelliktir. Isıl iletkenlik maddenin yapısına ve sıcaklığa bağlıdır. Metaller ısı iletkenliğini sağlayan çok sayıda serbest elektrona sahip olması nedeniyle, aynı zamanda ısı iletkenlikleri de oldukça iyidir. Isıl iletkenlik ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki Wiedemann–Franz (Kittel, 1965) ve Smith-Palmer (Poirier ve Geiger, 1974) bağıntıları ile verilir. Bu bağıntılar,

$$\frac{K}{\sigma} = LT \quad (\text{Wiedemann-Franz}) \quad (3.9)$$

$$K = 0.909L\sigma T + 10.5 \quad (\text{Smith-Palmer}) \quad (3.10)$$

şeklinde dir. Burada,  $K$  ısı iletkenlik katsayısı,  $\sigma$  elektriksel iletkenlik,  $L$  ise Lorenz sabitidir [44].  $L$  'nin değeri  $2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$ 'dir. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi, Wiedemann–Franz (Kittel, 1965) ve Smith Palmer (Poirier ve Geiger, 1974) bağıntılarında  $\sigma$  ve  $L$  değerleri kullanılarak belirlenmiştir.

### 3.8 Entalpi ve Öz ısı Ölçümleri

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazı malzemelerin termofiziksel karakterizasyonunda kullanılmaktadır. Özellikle erime, kristallenme, faz geçişi, camı geçiş gibi özellikler doğrudan ölçülmekte, entalpi ( $\Delta H$ ) ve öz ısı ( $C_p$ ) ise elde edilen eğrilerden hesaplanmaktadır. Entalpi,

$$\Delta H = \text{Alan (mJ)} / \text{Kütle (mg)} \quad (3.11)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Denklem 2.11'den görüldüğü gibi entalpi, birim kütle için erimesi için gerekli enerjidir. Burada Area (alan) oluşan pikin sınırladığı alandır birimi mJ ve kütle ise cihazın içine yerleştirilen örneğin mg mertebesinde kütle dir. Öz ısı ise,

$$C_p = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{m \beta_o} = \frac{dH}{dT} = \frac{\Delta H}{T_{peak}} \quad (3.12)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Burada,  $\beta_o = \frac{dT}{dt} = 10$  K/dakika (ısıtma hızı),  $dQ/dt$  =heat flow (ısı akışı) (J/s veya watt),  $m$  =kütle (değişik miktarlarda) ve Area= üçgenin alanı=0.5 tabanxyükseklik= 0.5 zamanxgüç (numunenin erimesi için gerekli enerji) ile verilir. Şekil 3.28’da bu termal analizde kullanılan **Perkin Elmer Pyris Diamond** DSC görülmektedir. Numunelerin DSC analizleri 10 K/dak ısıtma hızında, atmosfer basıncında sabit bir azot akışında yapıldı.



Şekil 3.28 Perkin Elmer Pyris Diamond DSC

## BÖLÜM IV

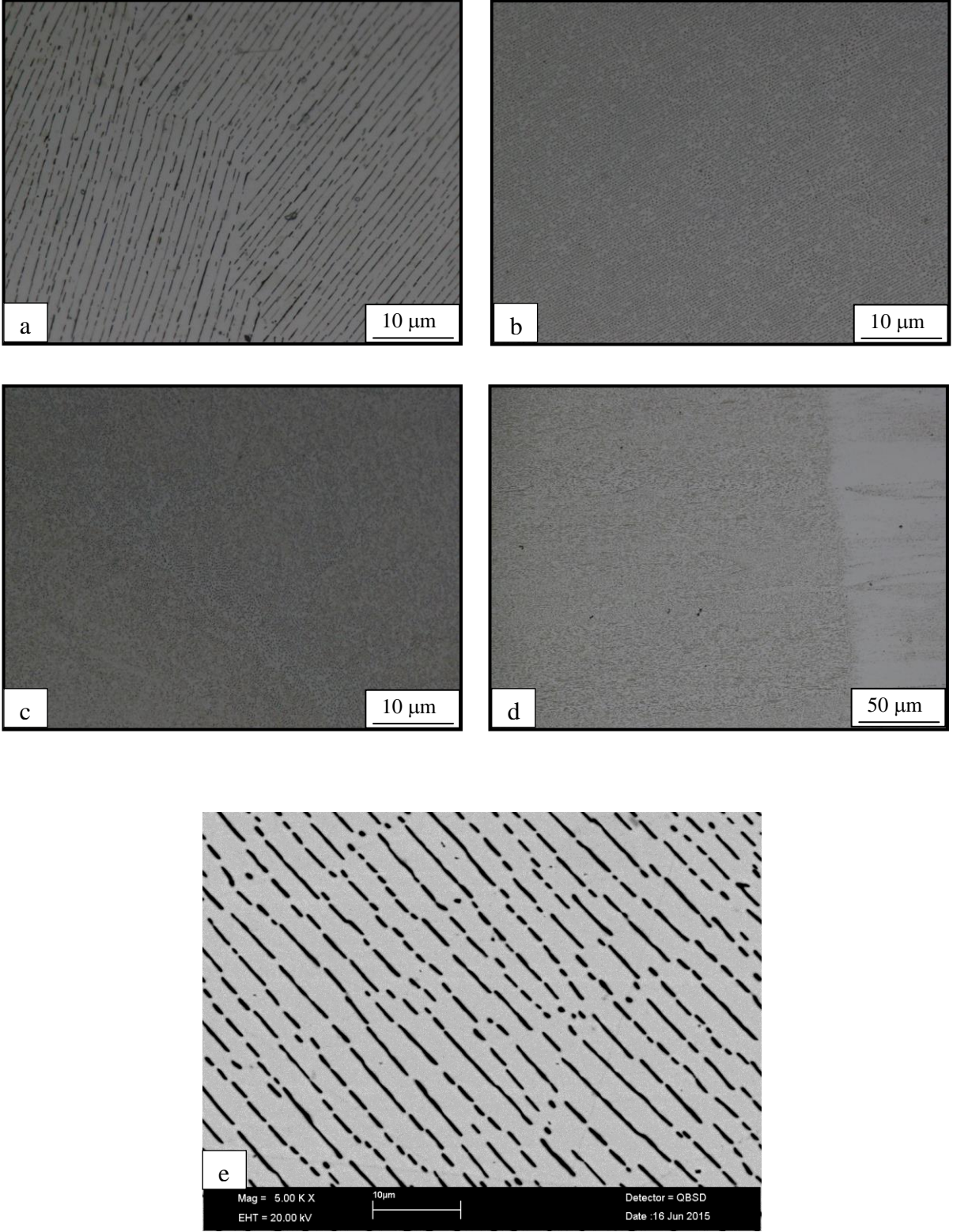
### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 4.1 Giriş

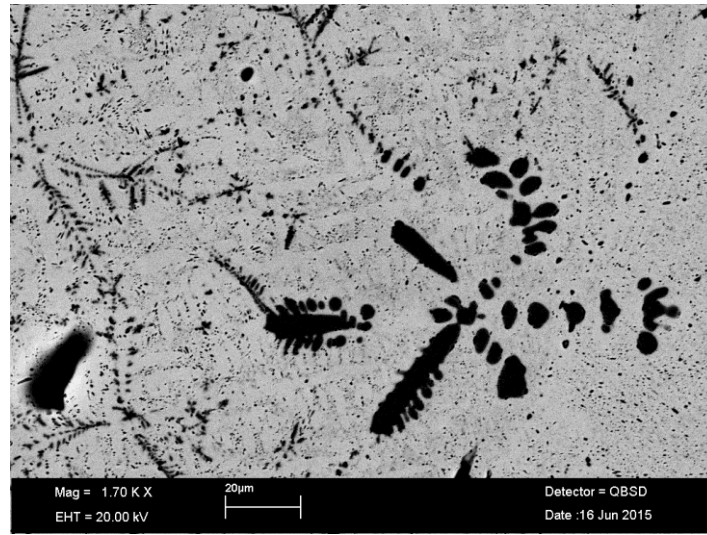
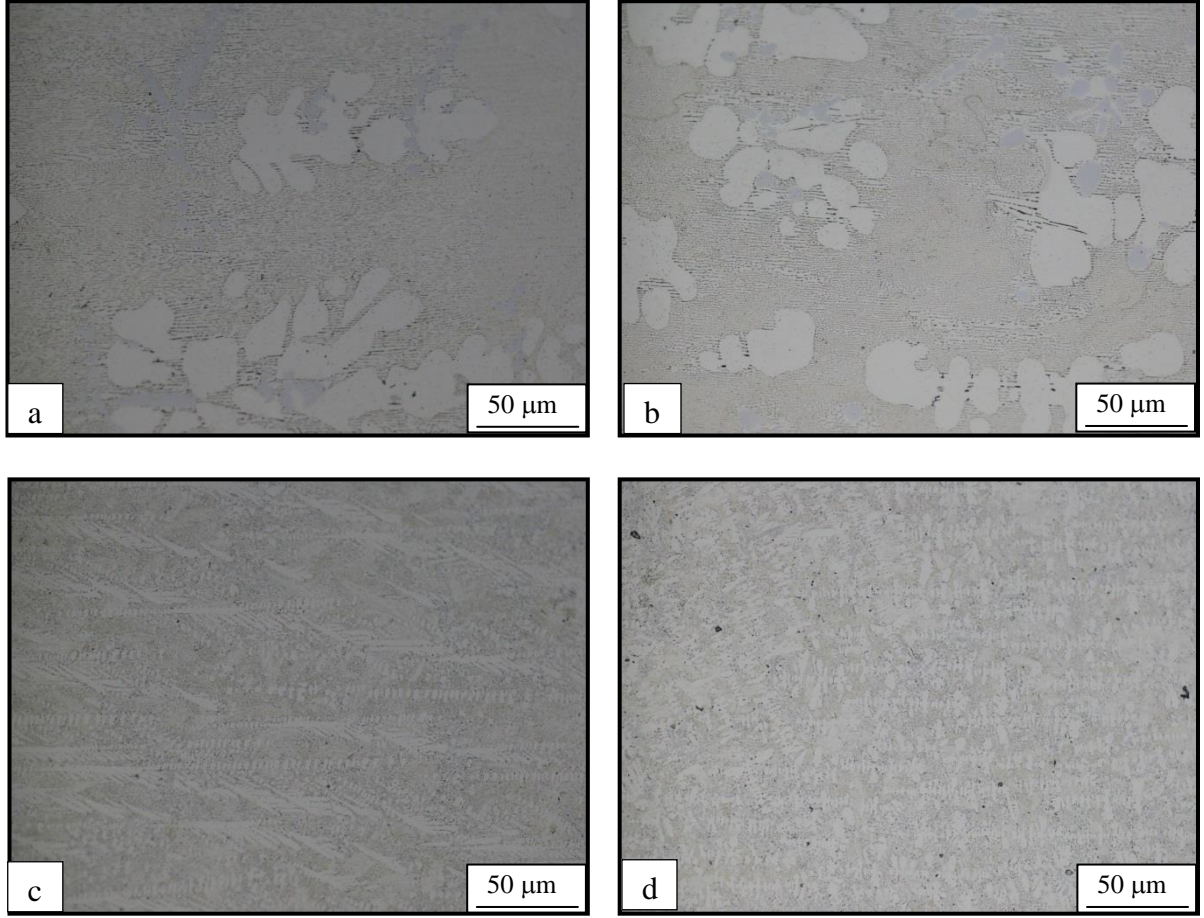
Sn-ağ.% 8.8 Zn, Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag ve Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımları vakumlu eritme ve döküm fırınları kullanılarak hazırlandı. Farklı katılaştırma hızlarında kontrollü katılaştırılan numunelerin görüntü analizleri yapıldı. Daha sonra numuneler sabit sıcaklıkta, farklı katılaştırma hızlarında Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınında yukarı yönlü katılaştırıldı. Katılaştırma hızının; mikrosertliğe, maksimum çekme gerilme dayanımına ve basma akma dayanımına etkisi araştırıldı. Alaşımların elektriksel öz dirençleri ( $\rho$ ) standart dört nokta yöntemi ile ölçüldü ve öz direncin sıcaklık katsayıları ( $\alpha$ ) hesaplandı. Alaşımların DSC analizleri yapılarak entalpi ( $\Delta H$ ) ve öz ısısı ( $C_p$ ) değerleri belirlendi. Elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırıldı. Ayrıca Wiedemann-Franz ve Smith-Palmer bağıntılarından hesaplanan termal iletkenlik katsayısı değerleri (K), deneysel elde edilen Sn-Zn alaşımlarına ait termal iletkenlik değerleriyle karşılaştırıldı.

#### 4.2 Görüntü Analizleri

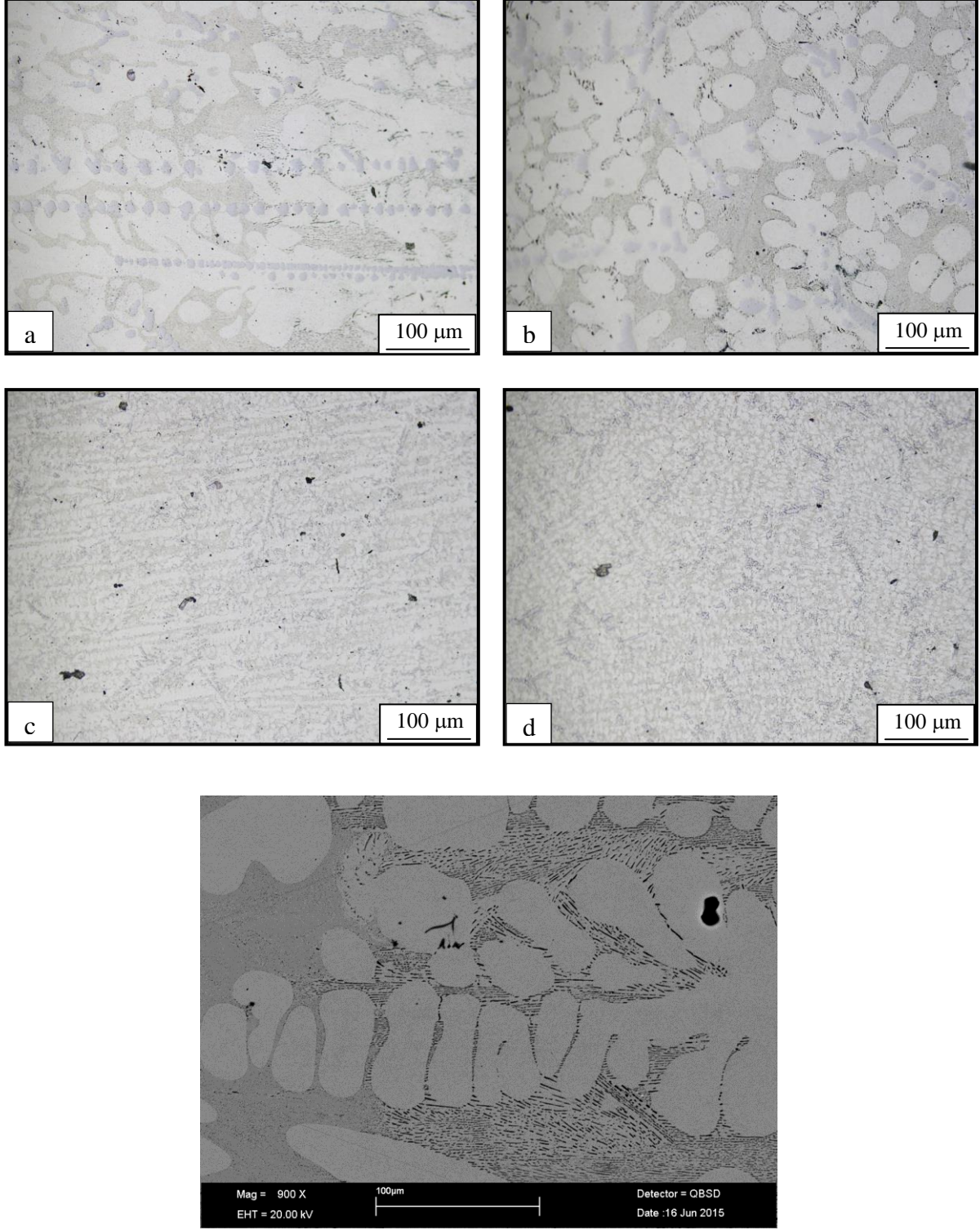
Şekil 4.1-3'de optik ve SEM mikroskoplarıyla farklı katılaştırma hızlarında numunelerin enine ve boyuna kesitlerinden çekilen mikroyapı fotoğraflarının bazıları verilmiştir. Düşük katılaştırma hızında çubuksal yapılı ötektikler ve dendritler kaba yapıda iken, katılaştırma hızının artmasıyla ötektik ve dendritik mikroyapılar küçülmüştür. Çok yüksek hızlarda ise çok daha ince taneli mikroyapılar oluşmuştur. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımı beklenildiği gibi tamamen çubuksal ötektik yapıda katılmıştır. Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında tüm hızlarda dendritik ve ötektik yapının birlikte bulunduğu yapılar meydana gelmiştir (Şekil 4.2). Şekil 4.2e'de görülen siyah faz ise gümüş fazıdır. Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında ise dendritlerin ağırlıklı olduğu bir mikroyapı meydana gelmiştir (Şekil 4.3). Şekil 4.3e'de görülen siyah fazda benzer şekilde gümüş fazıdır.



**Şekil 4.1** Doğrusal katılaştırılmış Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait ötektik mikroyapılar  
a) enine kesit ( $V=8.3 \mu\text{m/s}$ ), b) enine kesit ( $V=41.5 \mu\text{m/s}$ ), c) enine kesit ( $V=166 \mu\text{m/s}$ )  
d) boyuna kesit ( $V=41.5 \mu\text{m/s}$ ) e) enine kesite ait SEM fotoğrafı ( $V=41.5 \mu\text{m/s}$ )



**Şekil 4.2** Doğrusal katılaştırılmış Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait mikroyapılar a) boyuna kesit b) enine kesit ( $V=8.3 \mu\text{m/s}$ ), c) boyuna kesit d) enine kesit ( $V=790 \mu\text{m/s}$ ) e) boyuna kesite ait SEM fotoğrafı ( $V=41.5 \mu\text{m/s}$ )

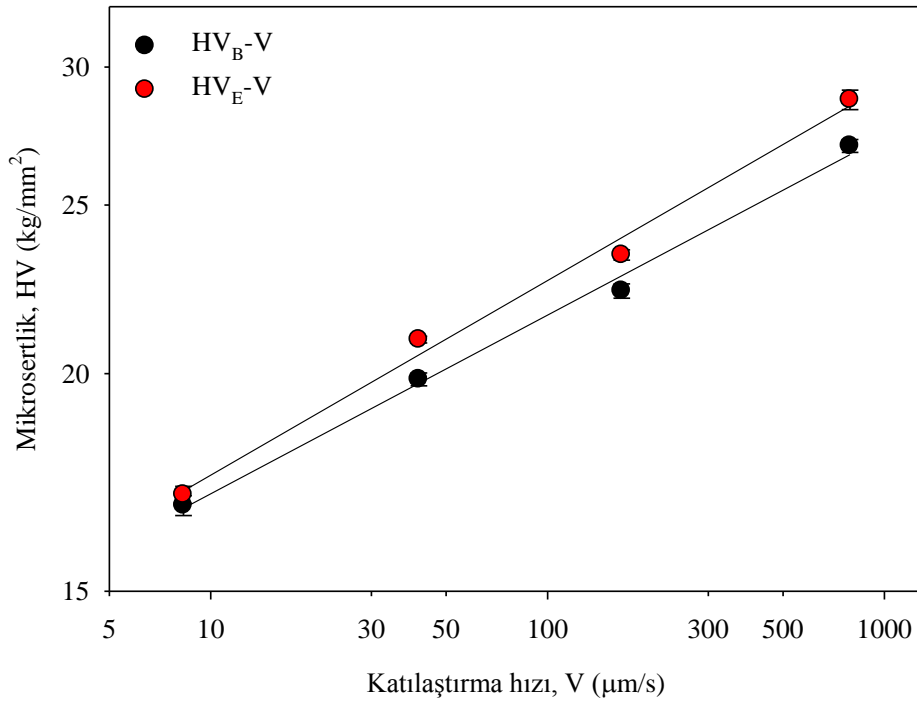


**Şekil 4.3** Doğrusal katılaştırılmış Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımına ait mikroyapılar a) boyuna kesit b) enine kesit ( $V=8.3 \mu\text{m/s}$ ), c) boyuna kesit d) enine kesit ( $V=790 \mu\text{m/s}$ ) e) boyuna kesite ait SEM fotoğrafı ( $V=41.5 \mu\text{m/s}$ )

### 4.3 Mikrosertlik Ölçümleri

#### 4.3.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında mikrosertlik ölçümleri

Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı Şekil 4.4’de, bu parametreler arası bağıntılar ise Çizelge 4.1’de verilmiştir. Sabit fırın sıcaklığında (500 °C) katılaştırma hızının artması mikrosertliği arttırmıştır. Katılaştırma hızının 8.3  $\mu\text{m/s}$ ’den 790  $\mu\text{m/s}$ ’ye artmasıyla mikrosertlik; enine kesitte 17.04  $\text{kg/mm}^2$ ’den 28.73  $\text{kg/mm}^2$ ’ye, boyuna kesitte 16.8  $\text{kg/mm}^2$ ’den 27.03  $\text{kg/mm}^2$ ’ye artmıştır.



Şekil 4.4 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızı ile değişimi

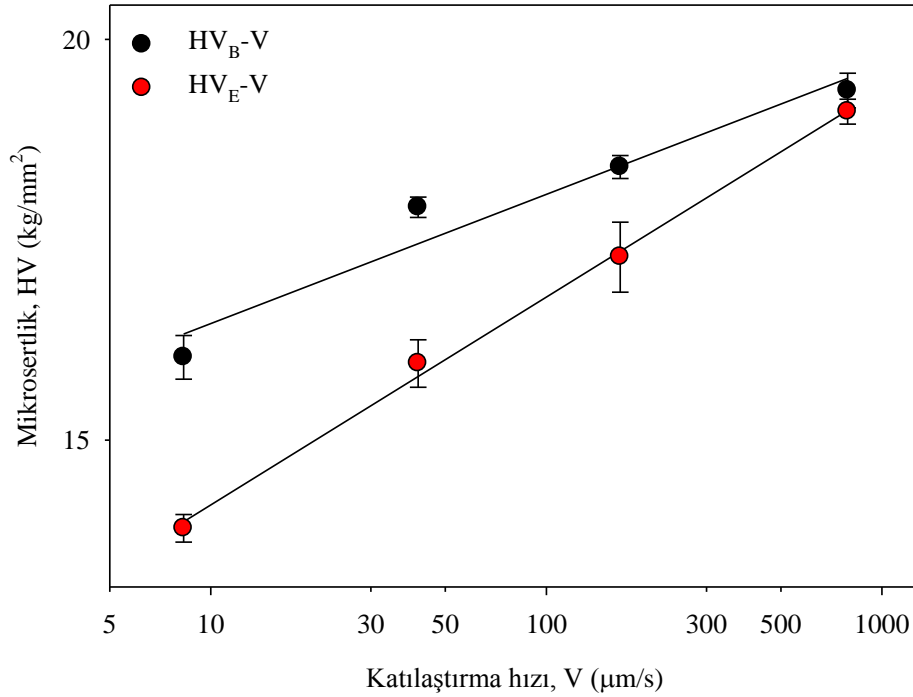
Çizelge 4.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı

| Bağıntılar              | Sabitler (k)  | Korelasyon katsayıları (r) |
|-------------------------|---|----------------------------|
| $HV_B=k_1V^{0.10}$      | $k_1=26.853 (\text{kg mm}^{-2.10}\text{sn}^{0.10})$ | $r_1= 0.997$               |
| $HV_E=k_2V^{0.11}$      | $k_2=28.899 (\text{kg mm}^{-2.11}\text{sn}^{0.11})$ | $r_2= 0.996$               |
| $HV_{ORT.}=k_3V^{0.11}$ | $k_3=28.248 (\text{kg mm}^{-2.11}\text{sn}^{0.11})$ | $r_3= 0.996$               |



#### 4.3.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında mikrosertlik ölçümleri

Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı Şekil 4.5’de, bu parametreler arası bağıntılar ise Çizelge 4.2’de verilmiştir. Sabit fırın sıcaklığında (500 °C) katılaştırma hızının artması mikrosertliği arttırmıştır. Katılaştırma hızının 8.3  $\mu\text{m/s}$ ’den 790  $\mu\text{m/s}$ ’ye artmasıyla mikrosertlik; enine kesitte 14.08  $\text{kg/mm}^2$ ’den 18.99  $\text{kg/mm}^2$ ’ye, boyuna kesitte 15.92  $\text{kg/mm}^2$ ’den 19.28  $\text{kg/mm}^2$ ’ye artmıştır.



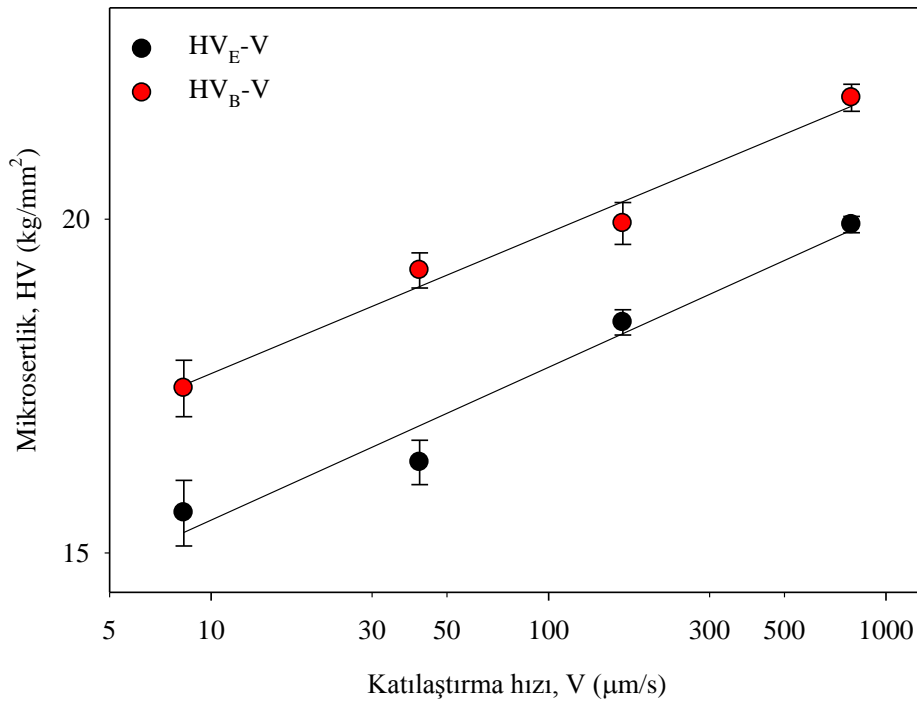
Şekil 4.5 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızı ile değişimi

Çizelge 4.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı

| Bağıntılar              | Sabitler (k)  | Korelasyon katsayıları (r) |
|-------------------------|---|----------------------------|
| $HV_B=k_1V^{0.04}$      | $k_1=19.588 (\text{kg mm}^{-2.04}\text{sn}^{0.04})$ | $r_1= 0.972$               |
| $HV_E=k_2V^{0.06}$      | $k_2=19.320 (\text{kg mm}^{-2.06}\text{sn}^{0.06})$ | $r_2= 0.998$               |
| $HV_{ORT.}=k_3V^{0.05}$ | $k_3=19.450 (\text{kg mm}^{-2.05}\text{sn}^{0.05})$ | $r_3= 0.992$               |

### 4.3.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında mikrosertlik ölçümleri

Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı Şekil 4.6'da, bu parametreler arası bağıntılar ise Çizelge 4.3'de verilmiştir. Sabit fırın sıcaklığında (500 °C) katılaştırma hızının artması mikrosertliği arttırmıştır. Katılaştırma hızının 8.3  $\mu\text{m/s}$ 'den 790  $\mu\text{m/s}$ 'ye artmasıyla mikrosertlik; enine kesitte 15.53  $\text{kg/mm}^2$ 'den 19.91  $\text{kg/mm}^2$ 'ye, boyuna kesitte 17.29  $\text{kg/mm}^2$ 'den 22.21  $\text{kg/mm}^2$ 'ye artmıştır.

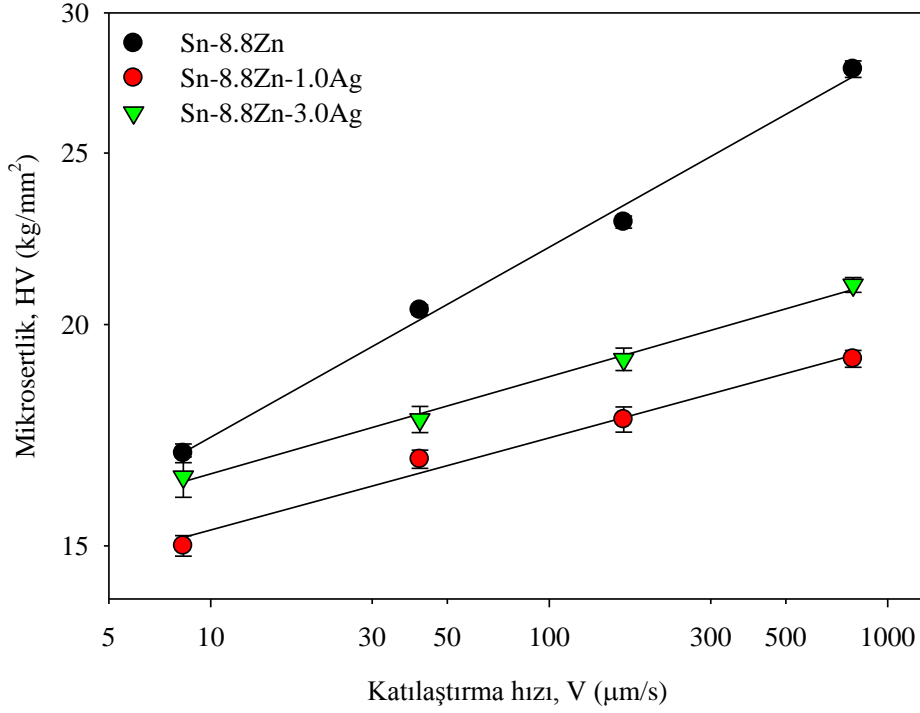


Şekil 4.6 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızı ile değişimi

Çizelge 4.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında mikrosertliğin katılaştırma hızına bağımlılığı

| Bağıntılar              | Sabitler (k)  | Korelasyon katsayıları (r) |
|-------------------------|---|----------------------------|
| $HV_B=k_1V^{0.05}$      | $k_1=22.335 (\text{kg mm}^{-2.05}\text{sn}^{0.05})$ | $r_1= 0.990$               |
| $HV_E=k_2V^{0.06}$      | $k_2=20.043 (\text{kg mm}^{-2.06}\text{sn}^{0.06})$ | $r_2= 0.981$               |
| $HV_{ORT.}=k_3V^{0.06}$ | $k_3=21.222 (\text{kg mm}^{-2.06}\text{sn}^{0.06})$ | $r_3= 0.997$               |

Ortalama mikrosertlik değerleri ise numunenin enine ve boyuna kesitlerinden ölçülen mikrosertlik değerlerinin ortalamasıdır. Alaşımların ortalama mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızına bağımlılıkları Şekil 4.7 ve Çizelge 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Ortalama mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi.

Çizelge 4.4 Ortalama mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi

| V<br>( $\mu\text{m/s}$ ) | HV ( $\text{kg/mm}^2$ ) |                |                |
|--------------------------|-------------------------|----------------|----------------|
|                          | Sn-8.8Zn                | Sn-8.8Zn-1.0Ag | Sn-8.8Zn-3.0Ag |
| 8.3                      | 16.92                   | 15.0           | 16.41          |
| 41.5                     | 20.38                   | 16.79          | 17.68          |
| 166                      | 22.85                   | 17.68          | 19.12          |
| 790                      | 27.88                   | 19.14          | 21.06          |

#### 4.3.4 Deneysel mikrosertlik sonuçlarının literatürle karşılaştırılması

##### 4.3.4.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

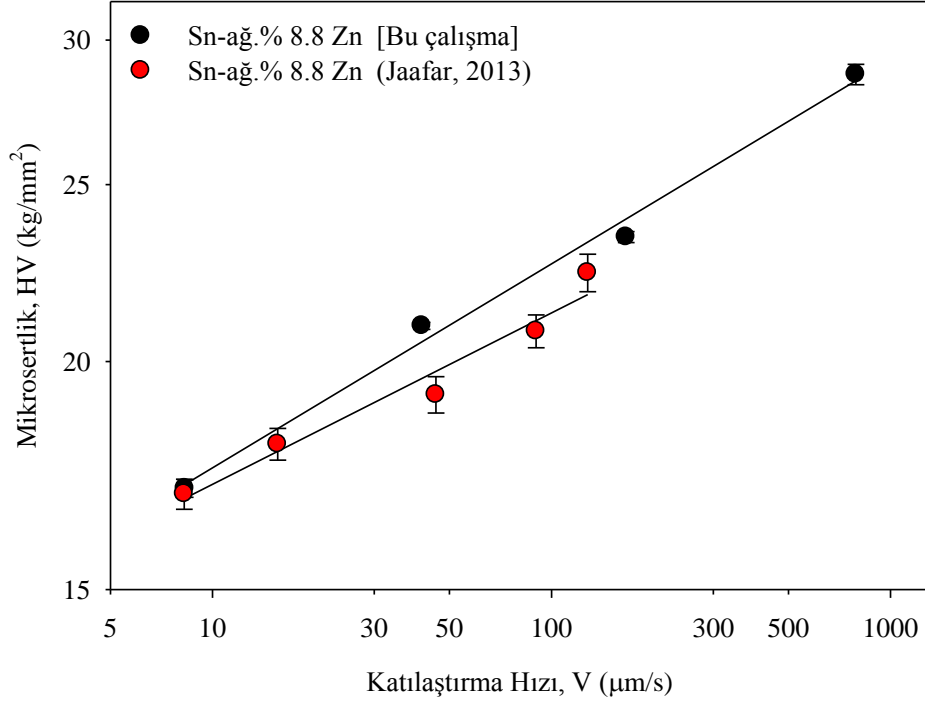
HV'ye bağlı olarak elde edilen V üstel değeri 0.11; Büyük ve Maraşlı (2009) tarafından Sn-3.5 Ag-0.9 Cu (ağ.%) ötektik alaşımında elde edilen 0.09, Fan vd . (2010) tarafından Ti-43 Al-3 Si (at.%) alaşımında elde edilen 0.10, Hu vd. (2012) tarafından Sn-ağ.% 1.0 Cu alaşımında elde edilen 0.11 üstel değerleri ile uyumlu çıkmıştır.

Sn-ağ.% 8.8 Zn ötektik alaşımının mikrosertlik testleri pek çok araştırmacı (Jaafar, 2013-Shafiq vd. 2012) tarafından yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Çizelge 4.5'de verilmiştir.

**Çizelge 4.5** Sn-Zn ötektik alaşımına ait mikrosertlik değerleri

| Bileşim (ağ.%) | HV (MPa) | Kaynak               |
|----------------|----------|----------------------|
| Sn-8.8Zn       | 166-273  | Bu çalışma           |
| Sn-8.8Zn       | 166-219  | Jaafar, 2013         |
| Sn-9.0Zn       | 155-180  | Hammam vd., 2010     |
| Sn-9.0Zn       | 120-260  | Shalaby, 2010        |
| Sn-8.8Zn       | 177-275  | Islam vd., 2005      |
| Sn-9.0Zn       | 133      | Ahmed vd., 2010      |
| Sn-9.0Zn       | 95       | Kamal ve Gouda, 2006 |
| Sn-9.0Zn       | 138-150  | Fouzder vd., 2010    |
| Sn-9.0Zn       | 165      | Das vd., 2009        |
| Sn-9.0Zn       | 127      | Shafiq vd., 2012     |

Bu tez çalışmasında Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında elde edilen mikrosertlik değerlerinin, Jaafar, (2013) tarafından Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında doğrusal katılaştırma yöntemi sonucunda elde edilen mikrosertlik değerleri ile karşılaştırılması Şekil 4.8'de verilmiştir. HV'ye bağlı olarak elde edilen V üstel değeri 0.11; Jaafar (2013) tarafından elde edilen 0.09 üstel değeri ile uyumlu çıkmıştır.



**Şekil 4.8** Bu çalışmaya ait mikrosertlik değerlerinin Jaafar (2013) tarafından Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında elde edilen mikrosertlik değerleri ile karşılaştırılması

#### 4.3.4.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

HV'ye bağlı olarak elde edilen V üstel değeri 0.05; Xiaowu vd. (2012) tarafından Sn-ağ.% 58 Bi ötektik alaşımında elde edilen 0.06, Çadırılı vd. (2011) tarafından Sn-23Bi-5Zn (ağ.%) alaşımında elde edilen 0.06, Guo vd. (2004) tarafından NiAl-28Cr-5Mo-1Hf (at.%) alaşımında elde edilen 0.04, Yılmaz ve Elliott, (1989) tarafından Al-Si alaşımında elde edilen 0.04 üstel değerleri ile uyumlu çıkmıştır.

Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag ötektik alaşımının mikrosertlik testleri bazı araştırmacılar (Ahmed vd. 2010, Song vd., 2003) tarafından yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir.

**Çizelge 4.6** Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımına ait mikrosertlik değerleri

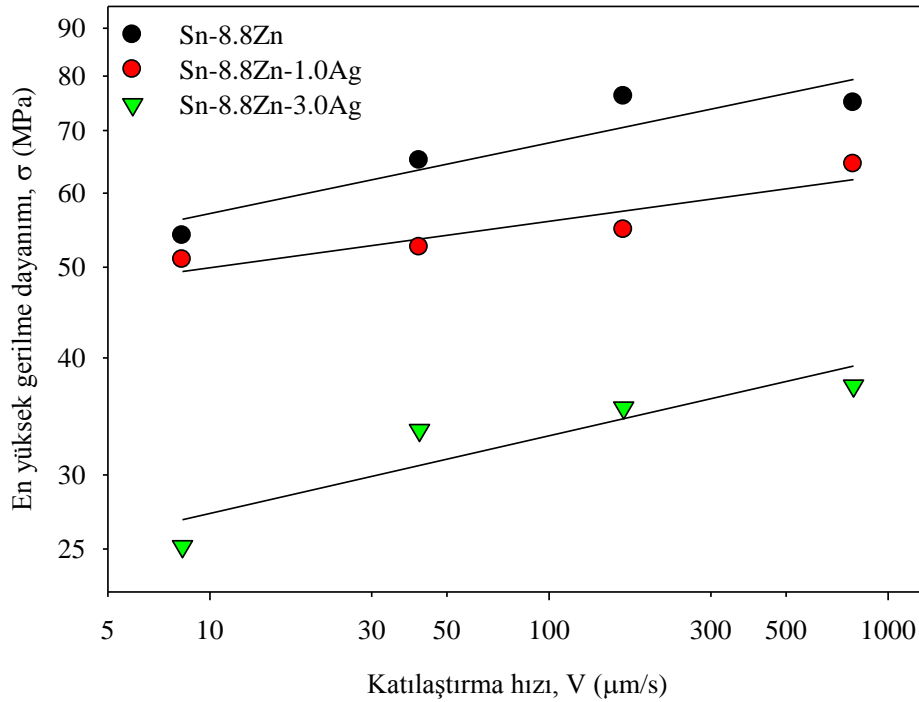
| Bileşim (ağ.%) | HV (MPa) | Kaynak          |
|----------------|----------|-----------------|
| Sn-8.8Zn-1.0Ag | 147-188  | Bu çalışma      |
| Sn-8.8Zn-1.0Ag | 157      | Ahmed vd., 2010 |
| Sn-8.8Zn-1.0Ag | 124-135  | Song vd., 2003  |

#### 4.3.4.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

HV'ye bağlı olarak elde edilen V üstel değeri 0.06; Guo vd. (2004) tarafından NiAl-28Cr-5Mo-1Hf (at.%) alaşımında elde edilen 0.04, Yılmaz ve Elliott, (1989) tarafından Al-Si alaşımında elde edilen 0.04 üstel değerleri ile uyumlu çıkmıştır.

#### 4.4 Maksimum Çekme Gerilme Dayanımlarının Ölçülmesi

Çalışılan alaşımların, sabit fırın sıcaklığında (500 °C) en yüksek gerilme dayanımlarının katılaştırma hızına bağımlılıkları Şekil 4.9'da, bu parametreler arası bağıntılar ise Çizelge 4.7'de verilmiştir. Katılaştırma hızının artması en yüksek gerilme dayanımının artmasına neden olmuştur. Katılaştırma hızının 8.3  $\mu\text{m/s}$ 'den 790  $\mu\text{m/s}$ 'ye artması; Sn-8.8Zn alaşımında gerilme dayanımını 54.0 MPa'dan 74.9 MPa değerine, Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımında 50.9 MPa'dan 64.4 MPa değerine, Sn-8.8Zn-3.0Ag alaşımında 25.2 MPa'dan 37.4 MPa değerine arttırmıştır (Çizelge 4.8).



Şekil 4.9 En yüksek gerilme dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi

**Çizelge 4.7** Maksimum gerilme dayanımlarının katılaştırma hızına bağımlılıkları

| Bağıntılar                      | Sabitler (k)                                       | Korelasyon katsayısı (r) | Alaşım         |
|---------------------------------|--|--------------------------|----------------|
| $\sigma_{\text{mak}}=kV^{0.08}$ | $k=83.858 \text{ MPa mm}^{-0.08} \text{ s}^{0.08}$ | $r_1=0.922$              | Sn-8.8Zn       |
| $\sigma_{\text{mak}}=kV^{0.05}$ | $k=62.907 \text{ MPa mm}^{-0.05} \text{ s}^{0.05}$ | $r_1=0.923$              | Sn-8.8Zn-1.0Ag |
| $\sigma_{\text{mak}}=kV^{0.08}$ | $k=39.985 \text{ MPa mm}^{-0.08} \text{ s}^{0.08}$ | $r_1=0.916$              | Sn-8.8Zn-3.0Ag |

**Çizelge 4.8** Maksimum gerilme dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi

| V<br>( $\mu\text{m/s}$ ) | $\sigma_{\text{mak.}}$ (MPa) |                |                |
|--------------------------|------------------------------|----------------|----------------|
|                          | Sn-8.8Zn                     | Sn-8.8Zn-1.0Ag | Sn-8.8Zn-3.0Ag |
| 8.3                      | 54.0                         | 50.9           | 25.2           |
| 41.5                     | 65.0                         | 52.5           | 33.5           |
| 166                      | 76.1                         | 54.8           | 35.4           |
| 790                      | 74.9                         | 64.4           | 37.4           |

#### 4.4.1 Deneysel maksimum gerilme dayanımı sonuçlarının literatürle karşılaştırılması

##### 4.4.1.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

$\sigma'$ ya bağlı olarak elde edilen V üstel değeri 0.08; Bromley vd. (1983) tarafından Sn-ağ.% 3.5 Ag alaşımında elde edilen 0.12, Hu vd. (2012) tarafından Sn-ağ.% 1.0 Cu alaşımında elde edilen 0.14 üstel değerinden biraz düşük çıkmıştır.

Sn-Zn ötektik alaşımının gerilme dayanım testleri pek çok araştırmacı (Hammam vd., 2010, Ahmed vd., (2010), Das vd., 2009, Shafiq vd., (2012), Garcia vd., (2010)-Klasik vd., (2012)) tarafından yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir.

**Çizelge 4.9** Sn-Zn ötektik alaşımına ait maksimum gerilme dayanım değerleri

| Bileşim (ağ.%) | $\sigma$ (MPa) | $\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> ) | Kaynak            |
|----------------|----------------|-------------------------------------|-------------------|
| Sn-8.8Zn       | 54.0-74.9      | 10 <sup>-3</sup>                    | Bu çalışma        |
| Sn-9.0Zn       | 43-60          | 10 <sup>-3</sup>                    | Garcia vd., 2010  |
| Sn-9.0Zn       | 45-58          | 0.16x10 <sup>-3</sup>               | Osorio vd., 2013  |
| Sn-9.0Zn       | 52             | 0.52x10 <sup>-3</sup>               | Das vd., 2009     |
| Sn-9.0Zn       | 78.1           | 0.94x10 <sup>-3</sup>               | Chan vd., 2014    |
| Sn-9.0Zn       | 41             | 0.52x10 <sup>-3</sup>               | Ahmed vd., 2010   |
| Sn-9.0Zn       | 51             | 0.35x10 <sup>-3</sup>               | Lee vd., 2008     |
| Sn-9.0Zn       | 78             | 0.94x10 <sup>-3</sup>               | Chen vd., 2006    |
| Sn-9.0Zn       | 46             | 0.51x10 <sup>-3</sup>               | Shafiq vd., 2012  |
| Sn-9.0Zn       | 67             | 10 <sup>-3</sup>                    | Kim vd., 2003     |
| Sn-9.0Zn       | 60             | –                                   | Villian vd., 2008 |
| Sn-9.0Zn       | 81-88          | –                                   | Klasik vd., 2012  |
| Sn-9.0Zn       | 58.2-65.4      | –                                   | Hammam vd. 2010   |

#### 4.4.1.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımının gerilme dayanım testleri pek çok araştırmacı (Ahmed vd., (2010), Song vd., (2003), Lee vd., 2008, Klasik vd., (2012)) tarafından yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Çizelge 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.10** Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait maksimum gerilme dayanım değerleri

| Bileşim (ağ.%)  | $\sigma$ (MPa) | $\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> ) | Kaynak           |
|-----------------|----------------|-------------------------------------|------------------|
| Sn-8.8Zn-1.0 Ag | 50.9-64.4      | 10 <sup>-3</sup>                    | Bu çalışma       |
| Sn-9.0Zn-1.0 Ag | 43.6           | 0.52x10 <sup>-3</sup>               | Ahmed vd., 2010  |
| Sn-9.0Zn-1.0 Ag | 43             | 0.35x10 <sup>-3</sup>               | Lee vd., 2008    |
| Sn-8.8Zn-1.0 Ag | 46             | 0.75x10 <sup>-3</sup>               | Sond vd., 2003   |
| Sn-9.0Zn-1.0 Ag | 65-76          | –                                   | Klasik vd., 2012 |



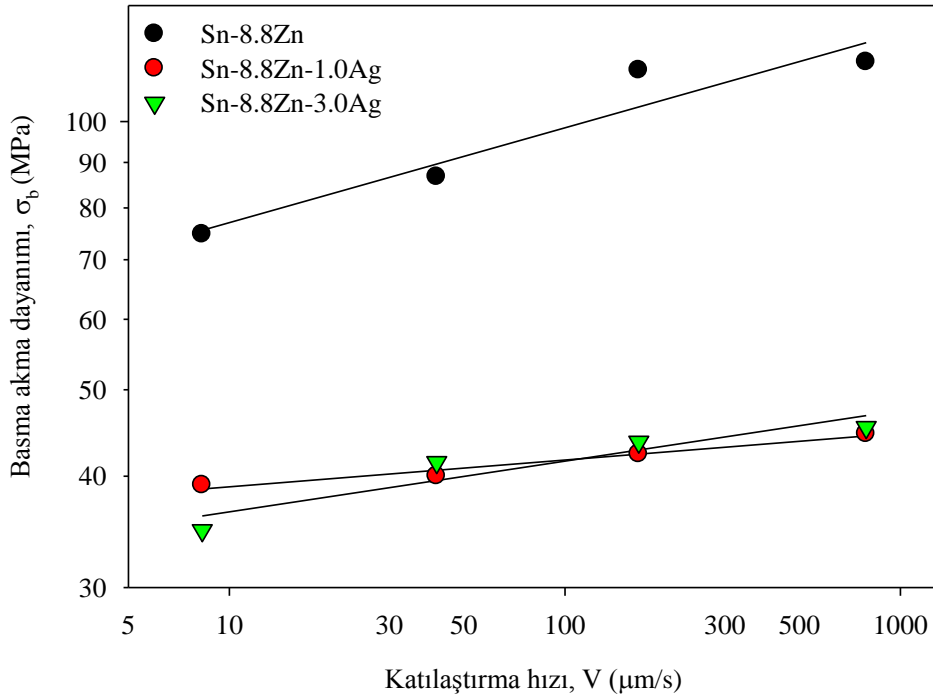
#### 4.4.1.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

**Çizelge 4.11** Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0-4.0 Ag alaşımına ait maksimum gerilme dayanım değerleri

| Bileşim (ağ.%)  | $\sigma$ (MPa) | $\dot{\epsilon}$ ( $s^{-1}$ ) | Kaynak         |
|-----------------|----------------|-------------------------------|----------------|
| Sn-8.8Zn-3.0 Ag | 25.2-37.4      | $1.2 \times 10^{-3}$          | Bu çalışma     |
| Sn-9.0Zn-3.5 Ag | 37             | $0.75 \times 10^{-3}$         | Song vd., 2003 |
| Sn-9.0Zn-4.0 Ag | 51             | $0.35 \times 10^{-3}$         | Lee vd., 2008  |

#### 4.5 Basma Akma Dayanımının Ölçülmesi

Çalışılan alaşımların, sabit fırın sıcaklığında (500 °C) basma akma dayanımlarının katılaştırma hızına bağımlılıkları Şekil 4.10'da, bu parametreler arası bağıntılar ise Çizelge 4.12'de verilmiştir. Katılaştırma hızının artması basma akma dayanımının artmasına neden olmuştur. Katılaştırma hızının 8.3  $\mu\text{m/s}$ 'den 790  $\mu\text{m/s}$ 'ye artması; Sn-8.8Zn alaşımında akma dayanımını 74.7 MPa'dan 116.6 MPa değerine, Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımında 39.1 MPa'dan 44.6 MPa değerine, Sn-8.8Zn-3.0Ag alaşımında 34.8 MPa'dan 45.4 MPa değerine arttırmıştır (Çizelge 4.13).



Şekil 4.10 Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi

**Çizelge 4.12** Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızına bağımlılıkları

| Bağıntılar           | Sabitler (k)                                    | Korelasyon katsayısı (r) | Alaşım         |
|----------------------|---|--------------------------|----------------|
| $\sigma_b=kV^{0.11}$ | $k=125.3 \text{ MPa mm}^{-0.11}\text{s}^{0.11}$ | $r_1=0.953$              | Sn-8.8Zn       |
| $\sigma_b=kV^{0.03}$ | $k=44.6 \text{ MPa mm}^{-0.03}\text{s}^{0.03}$  | $r_1=0.982$              | Sn-8.8Zn-1.0Ag |
| $\sigma_b=kV^{0.06}$ | $k=47.4 \text{ MPa mm}^{-0.06}\text{s}^{0.06}$  | $r_1=0.939$              | Sn-8.8Zn-3.0Ag |

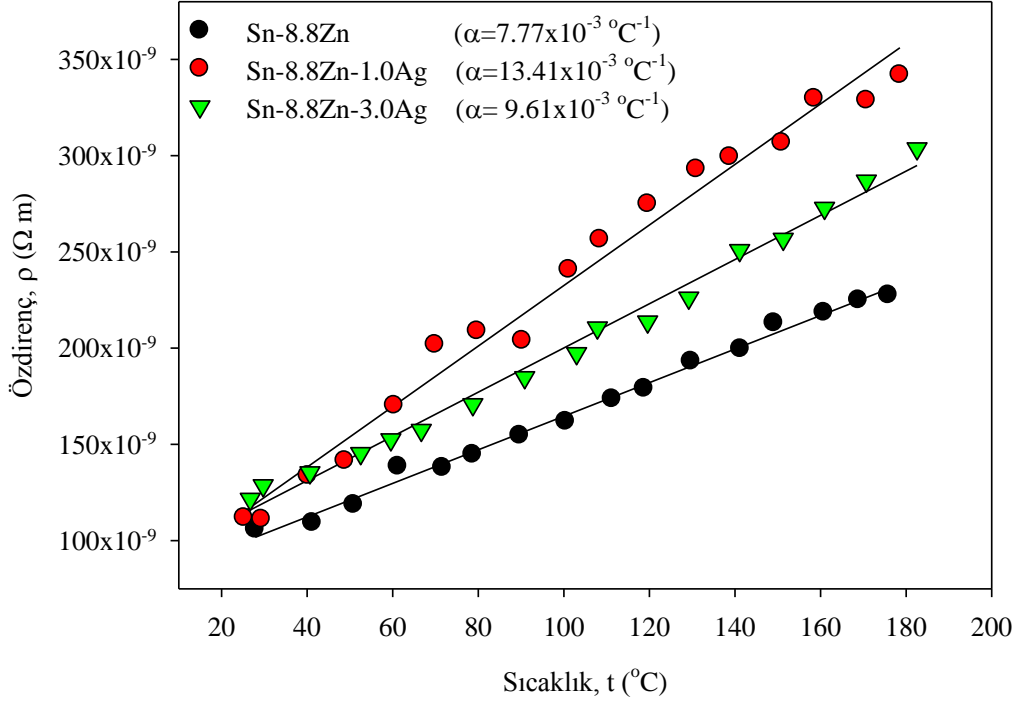
**Çizelge 4.13** Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi

| V<br>( $\mu\text{m/s}$ ) | $\sigma_b$ (MPa) |                |                |
|--------------------------|------------------|----------------|----------------|
|                          | Sn-8.8Zn         | Sn-8.8Zn-1.0Ag | Sn-8.8Zn-3.0Ag |
| 8.3                      | 74.7             | 39.1           | 34.8           |
| 41.5                     | 86.7             | 40.0           | 41.5           |
| 166                      | 114.2            | 42.3           | 43.7           |
| 790                      | 116.6            | 44.6           | 45.4           |

## 4.6 Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi

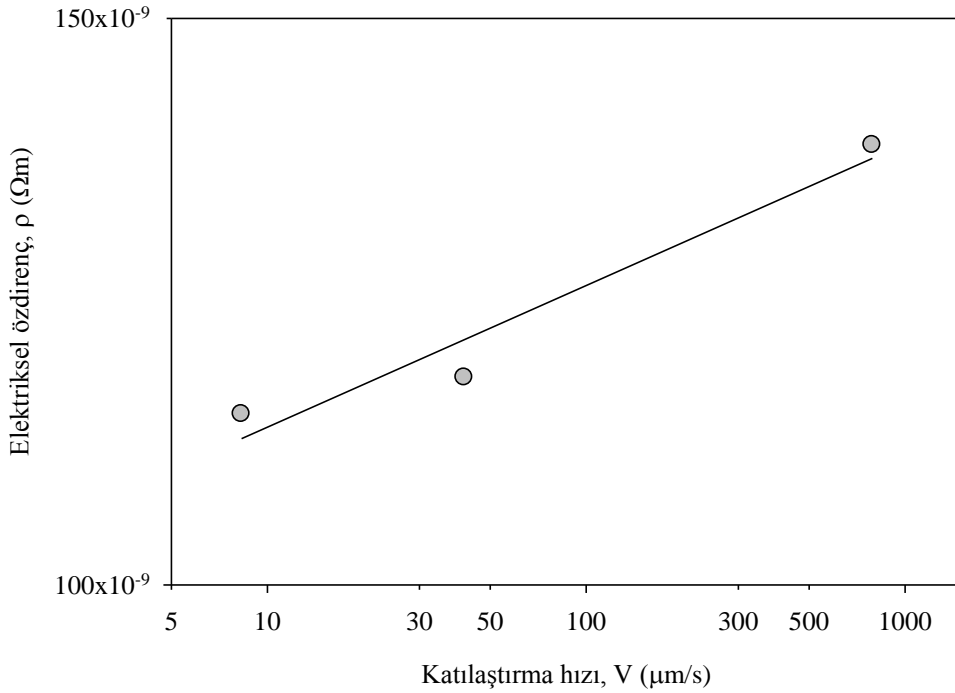
### 4.6.1 Elektriksel özdirençlerin ölçümü

Çalışılan alaşımların elektriksel özdirençlerinin sıcaklık ile değişimi Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil’den görüldüğü gibi sıcaklığın artması metalik bir davranış olarak özdirenci arttırmıştır. Sn-8.8 Zn alaşımında, 27.9-175.8 °C sıcaklık aralığında özdirenç  $1.06 \times 10^{-7}$ - $2.28 \times 10^{-7}$   $\Omega$  m değerlerinde, Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımında 25.3-178.6 °C sıcaklık aralığında özdirenç  $1.12 \times 10^{-7}$ - $3.42 \times 10^{-7}$   $\Omega$  m değerlerinde, Sn-8.8Zn-3.0Ag alaşımında 26.7-182.5 °C sıcaklık aralığında özdirenç  $1.21 \times 10^{-7}$ - $3.03 \times 10^{-7}$   $\Omega$  m değerlerinde ölçülmüştür. Özdirencin sıcaklık katsayısı ( $\alpha$ ); Sn-8.8Zn alaşımında  $7.77 \times 10^{-3}$  °C<sup>-1</sup>, Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımında  $13.41 \times 10^{-3}$  °C<sup>-1</sup> ve Sn-8.8Zn-3.0Ag alaşımında  $9.61 \times 10^{-3}$  °C<sup>-1</sup> alaşımında olarak hesaplanmıştır.

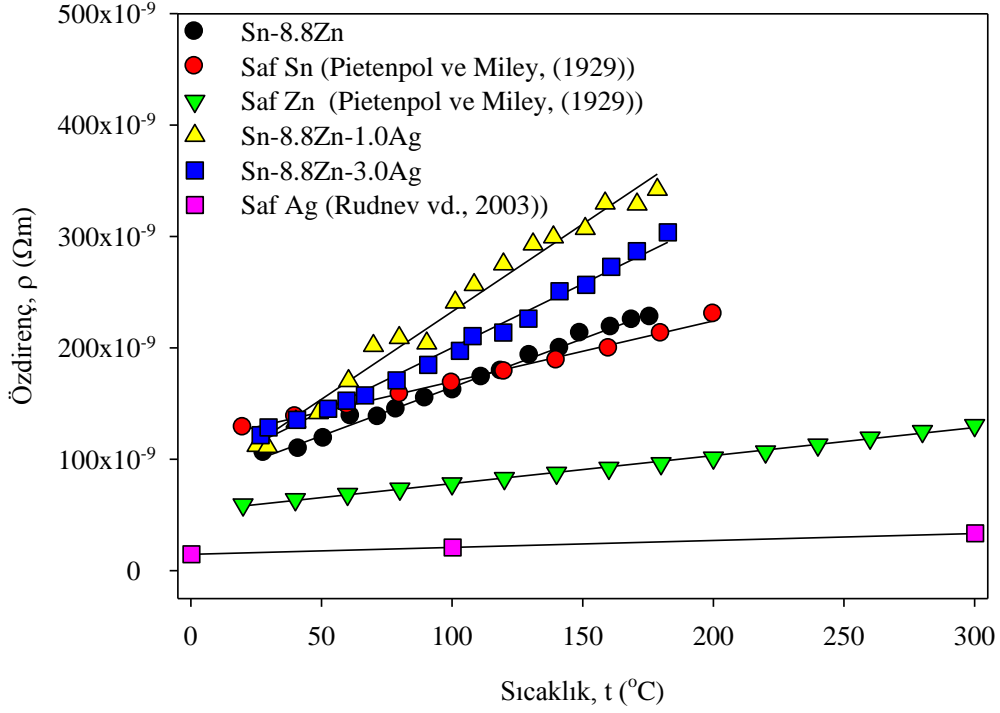


**Şekil 4.11** Elektriksel özdirençlerin sıcaklıkla değişimi

Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında: özdirençin katılaştırma hızına bağımlılığı Şekil 4.12'de verilmiştir. Katılaştırma hızının  $8.3 \mu\text{m/s}$ 'den  $790 \mu\text{m/s}$ 'ye artması, özdirenç  $1.13 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ 'den  $1.37 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$  değerine arttırmıştır. Şekil 4.13'de ise alaşımların özdirençlerinin saf metallerle karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 4.12** Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında özdirençin katılaştırma hızı ile değişimi



**Şekil 4.13** Alaşımların özdirençlerinin saf metallerle karşılaştırılması

#### 4.6.2 Deneysel elektriksel özdirenç sonuçların literatürle karşılaştırılması

##### 4.6.2.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

Farklı araştırmacılar tarafından Sn-8.8Zn alaşımında ölçülen elektriksel özdirenç değerleri Çizelge 4.14’de verilmiştir.

**Çizelge 4.14** Sn-8.8Zn alaşımında ölçülen özdirenç değerleri.

| Bileşim (ağ.%) | $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ ) $\times 10^{-8}$ | Kaynak               |
|----------------|--|----------------------|
| Sn-8.8 Zn      | 11.3-13.7                                    | Bu çalışma           |
| Sn-8.8 Zn      | 11.1-15.9                                    | Jaafar, 2013         |
| Sn-9.0 Zn      | 14.0   | Shalaby, 2010        |
| Sn-8.8 Zn      | 11.7   | Gancarz vd., 2014    |
| Sn-9.0 Zn      | 16.2   | Kamal ve Gaudo, 2006 |
| Sn-9.0 Zn      | 12.1   | Matsugi vd., 2007    |
| Sn-9.0 Zn      | 16.2   | Kamal vd., 2005      |

#### 4.6.2.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait deneysel sonuçların karşılaştırılması

Bir araştırmacı tarafından Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımında ölçülen elektriksel özdirenç değeri Çizelge 4.15’de verilmiştir.

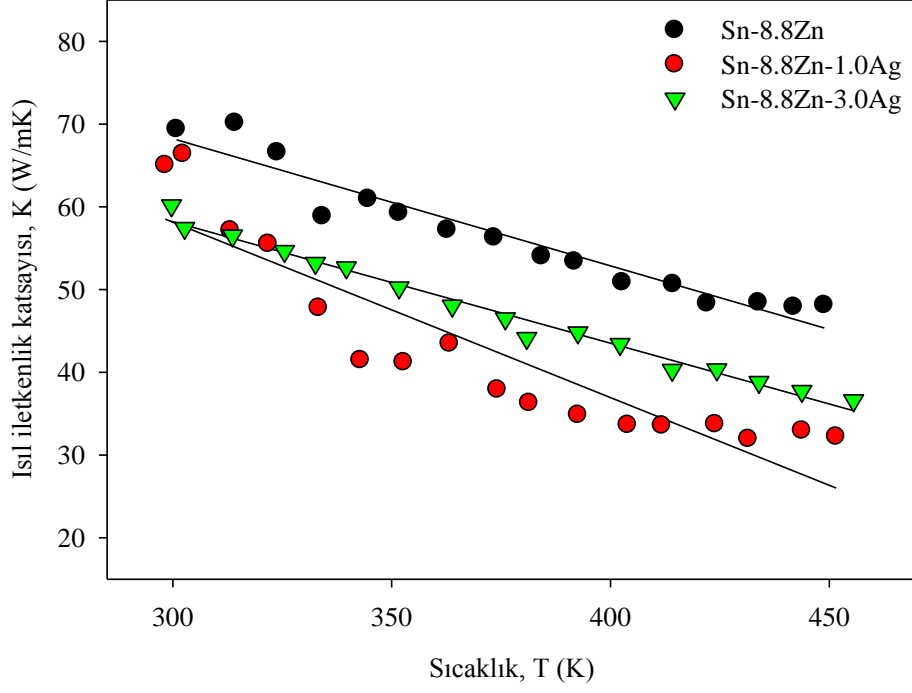
**Çizelge 4.15** Sn-8.8 Zn-1.0Ag alaşımında ölçülen özdirenç değerleri.

| Bileşim (ağ.%) | $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ ) $\times 10^{-8}$ | Kaynak          |
|----------------|--|-----------------|
| Sn-8.8Zn-1.0Ag | 12.3-12.7                                    | Bu çalışma      |
| Sn-9.0Zn-1.0Ag | 19.9   | Kamal vd., 2005 |
| Sn-9.0Zn-1.0Ag | 33.1   | Guoda vd., 2014 |

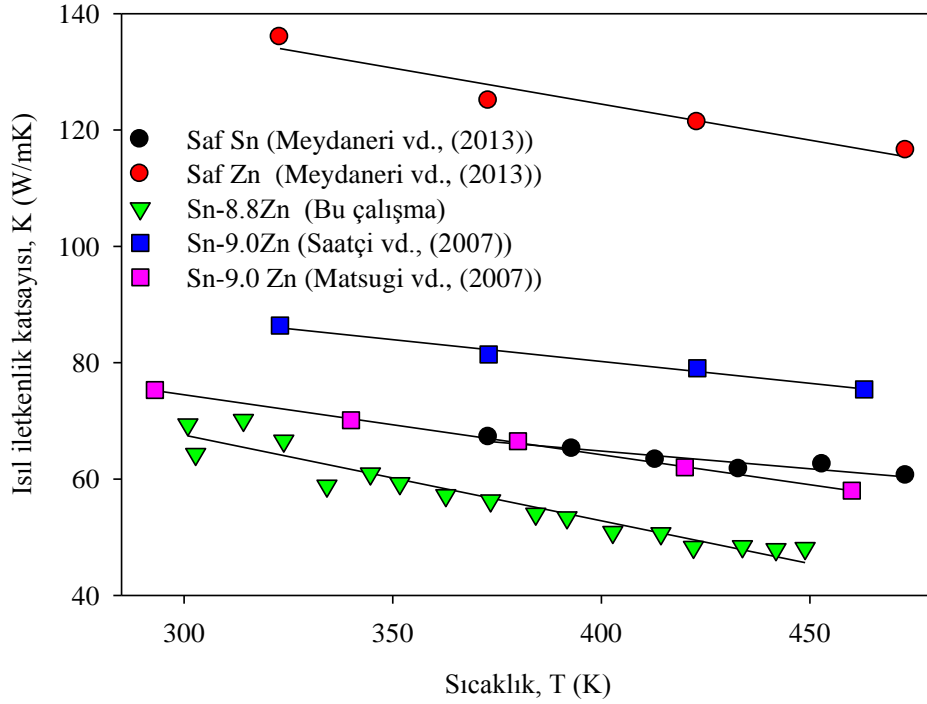
#### 4.7 Isıl İletkenliğin Hesaplanması

##### 4.7.1 Alaşımların ısı iletkenliğinin hesaplanması

Isıl iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi,  $\sigma$  ve  $L$  değerleri kullanılarak Wiedemann–Franz (Kittel, 1965) bağıntısından belirlendi.  $\sigma$  değerleri deneysel olarak belirlenmişti. Çalışılan alaşımlar kalay esaslı alaşımlar olduğundan, hesaplamalarda kalayın Lorenz sayısı ( $2.44 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$  [44]) kullanıldı. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.14’de verilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla hesaplanan ısı iletkenlik değerleri azalmaktadır. Şekil 4.15’de ise Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında hesaplanan ısı iletkenliğin literatürle ve saf metallerle karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4.14 Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi

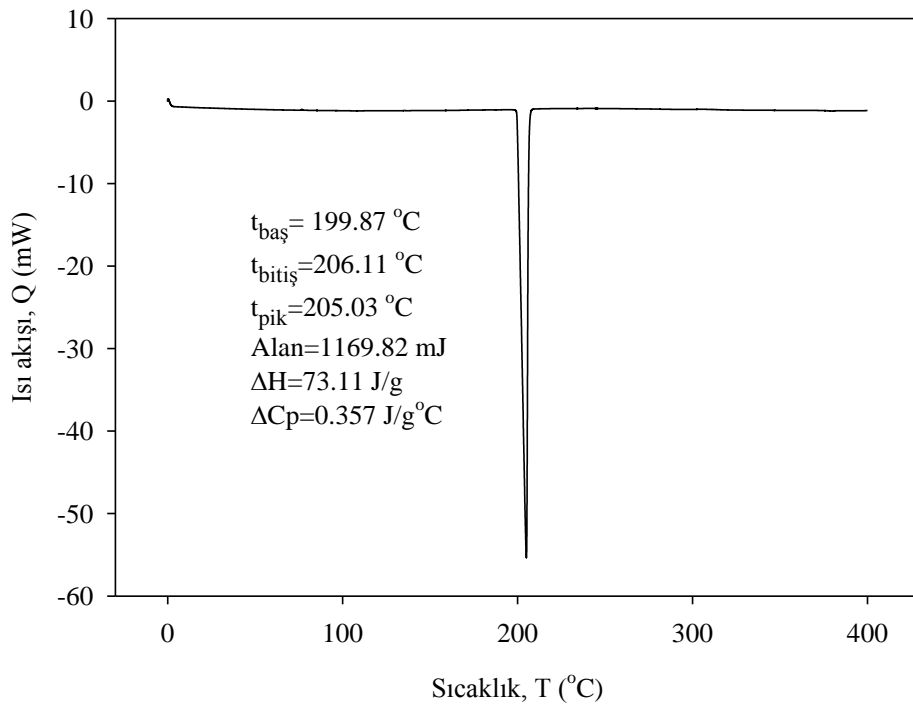


Şekil 4.15 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında hesaplanan ısı iletkenliğin, saf metallerle ve literatürle karşılaştırılması

## 4.8 Isıl Özelliklerin İncelenmesi

### 4.8.1 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında ısıl özelliklerin incelenmesi

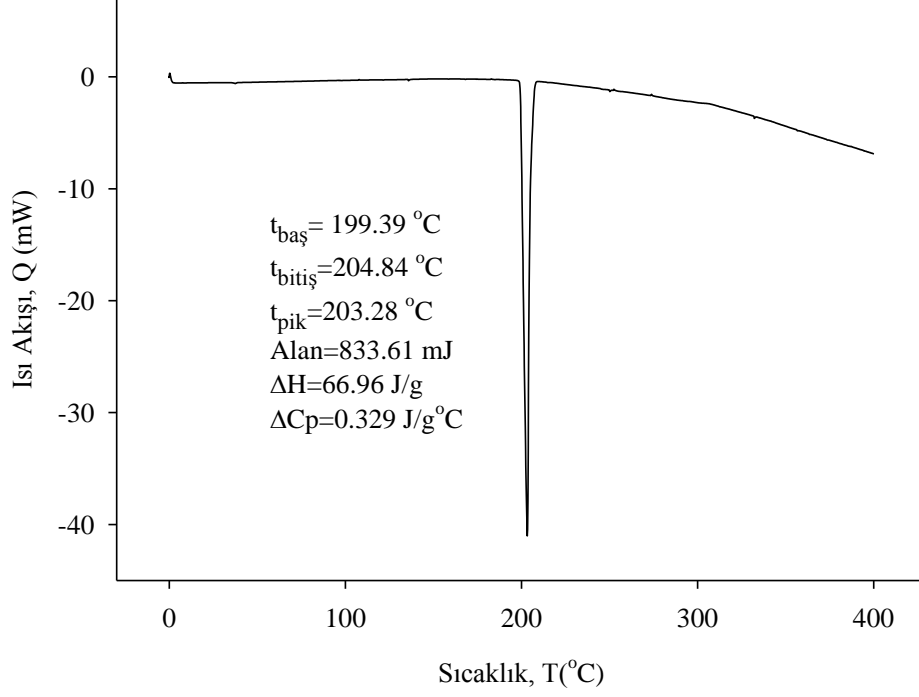
Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında, ısı akışının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir. Erime esnasında keskin bir pik meydana gelmiştir. Bu ısı akışı-sıcaklık eğrisinden alaşımın erime sıcaklığı 205 °C, entalpi ( $\Delta H$ ) 73.1 J/g ve özısı ( $\Delta C_p$ ) 0.36 J/g °C olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.16 Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi

### 4.8.2 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında ısıl özelliklerin incelenmesi

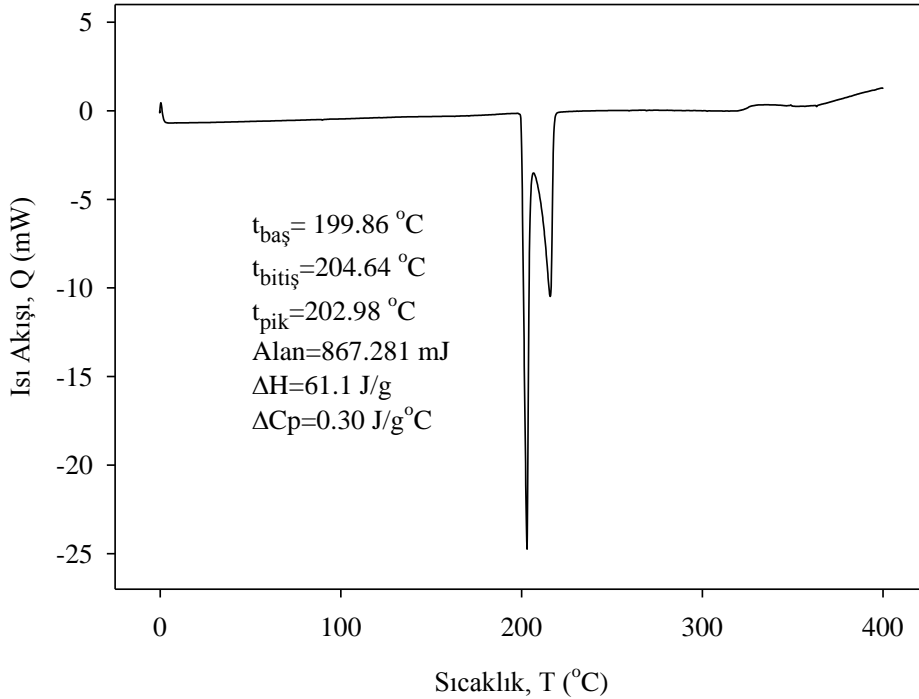
Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında, ısı akışının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.17'de verilmiştir. Bu ısı akışı-sıcaklık eğrisinden alaşımın erime sıcaklığı 203.3 °C,  $\Delta H$  67.0 J/g ve  $\Delta C_p$  0.33 J/g °C olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.17 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi

#### 4.8.3 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında ısıl özelliklerin incelenmesi

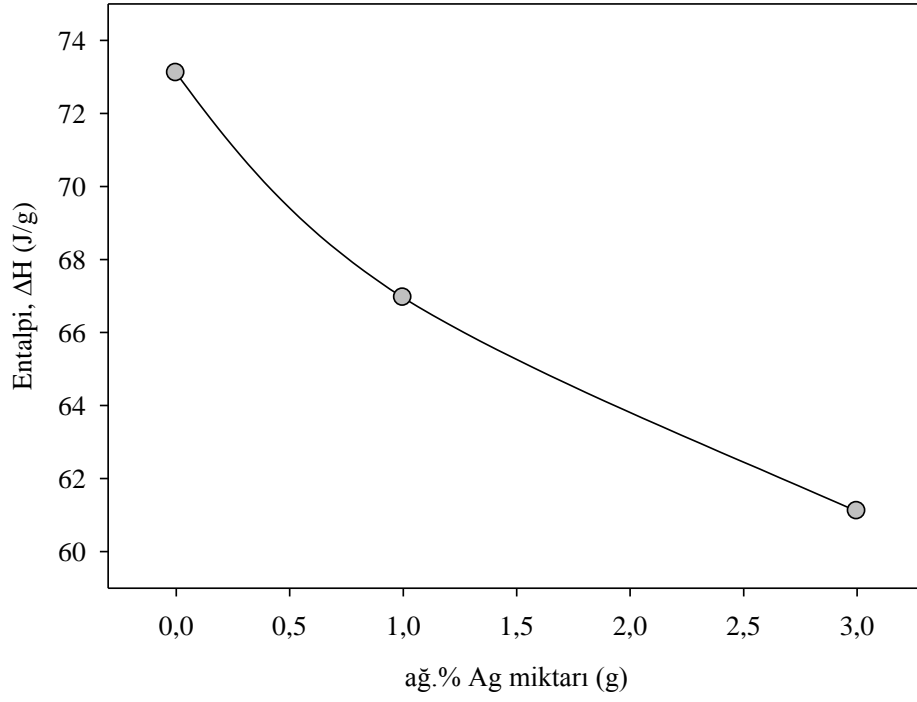
Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında, ısı akışının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu ısı akışı-sıcaklık eğrisinden alaşımın erime sıcaklığı 203 °C,  $\Delta H$  61.1 J/g ve  $\Delta C_p$  0.30 J/g °C olarak tespit edilmiştir.



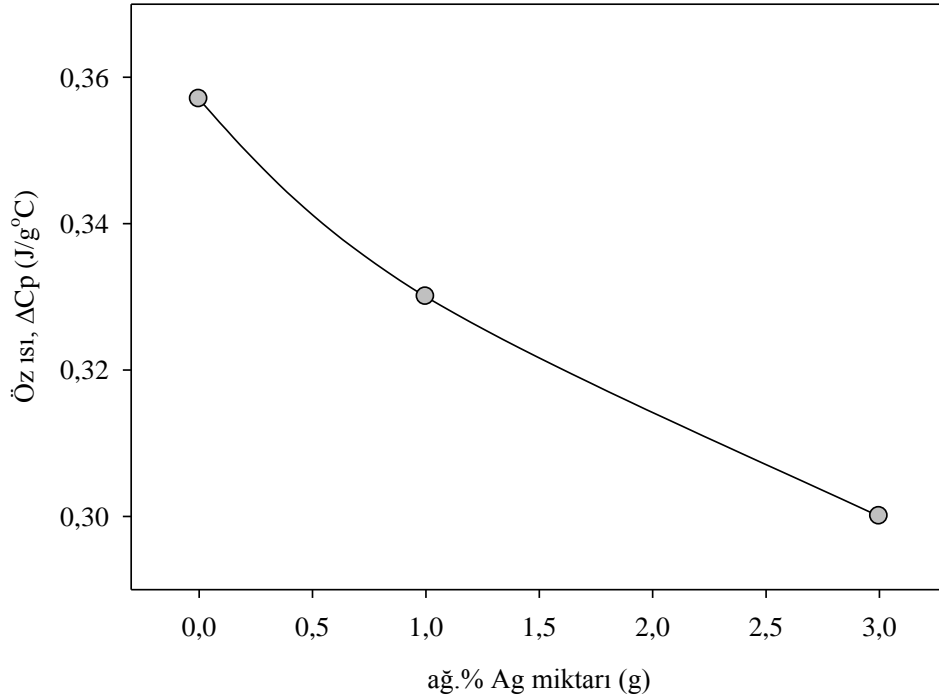
Şekil 4.18 Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi



Şekil 4.19 ve 4.20’de alaşımların entalpi ve öz ısılarının gümüş miktarı ile değişimi verilmiştir. Gümüş miktarının artması ile entalpi ve öz ısı değerleri azalmaktadır.



Şekil 4.19 Alaşımların entalpilerinin gümüş miktarına bağımlılığı



Şekil 4.20 Alaşımların öz ısılarının gümüş miktarına bağımlılığı

#### 4.8.4 Deneysel sonuçların literatürle karşılaştırılması

**Çizelge 4.16** Entalpi ve özısı değerlerinin literatürle karşılaştırılması

| Bileşim (ağ.%) | Erime entalpisi<br>$\Delta H$ (J/g) | Öz ısı $\Delta C_p$<br>(J/g °C) | Kaynak               |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Sn-8.8Zn       | 73.1                                | 0.36                            | Bu çalışma           |
| Sn-9.0Zn       | 72.7                                | -                               | Daly vd., 2009       |
| Sn-9.0Zn       | 59.8                                | -                               | Daly ve Hammad, 2010 |
| Sn-9.0Zn       | 46.9                                | 0.30                            | Wu vd., 2009         |
| Sn-9.0Zn-1.0Ag | 67.0                                | 0.33                            | Bu çalışma           |
| Sn-9.0Zn-1.0Ag | 47.0                                | 0.25                            | Wu vd., 2009         |
| Sn-9.0Zn-3.0Ag | 61.1                                | 0.30                            | Bu çalışma           |
| Sn-9.0Zn-3.0Ag | 43.7                                | 0.24                            | Wu vd., 2009         |

## BÖLÜM V

### SONUÇ VE YORUM

Ag (ağ.% 0.0, 1.0, 3.0) katkılı Sn-ağ.% 8.8 Zn ötektik alaşımları vakumlu eritme fırını ve döküm fırını kullanılarak hazırlandı. Daha sonra numuneler sabit fırın sıcaklığında, farklı katılaştırma hızlarında Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınında yukarı yönlü katılaştırıldı. Katılaştırma hızının; mikrosertliğe, en yüksek çekme gerilme dayanımına ve basma akma dayanımına etkisi araştırıldı. Alaşımların özdirençleri standart dört nokta yöntemi ile ölçüldü ve özdirencin sıcaklık katsayıları hesaplandı. DSC analizleri yapılarak entalpi ve özısı değişim değerleri belirlendi. Ayrıca Wiedemann-Franz [42] bağıntısından hesaplanan ısı iletkenlik katsayısı değerleri, deneysel elde edilen Sn-Zn alaşımlarına ait ısı iletkenlik değerleriyle karşılaştırıldı. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırıldı.

Doğrusal katılaştırılan alaşımların mikroyapıları incelendiğinde; Sn-ağ.% 8.8 Zn alaşımında tamamen ötektik yapının olduğu, Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında dendritik ve ötektik yapının birlikte bulunduğu ve Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında ise dendritik yapının ağırlıkta olduğu mikroyapılar meydana gelmiştir.

Katılaştırma hızının artmasıyla alaşımların mikroyapılarında daha ince bir yapının meydana geldiği bunun sonucunda da mikrosertliğin, en yüksek çekme gerilme dayanımının ve basma akma dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Ag katkısının elektriksel özdirence etkisi incelendiğinde; özdirenci en fazla olan alaşımın Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag olduğu, özdirenci en düşük alaşımın da Sn-ağ.% 8.8 Zn olduğu ölçülmüştür. Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımının özdirenci, Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımının özdirencinden daha az olarak ölçülmüştür. Daha fazla gümüş katkısıyla birlikte özdirencin azalacağı yani iletkenliğin artacağı beklenmektedir. Ayrıca Wiedemann-Franz [42] bağıntısından hesaplanan termal iletkenlik değerlerinin, deneysel elde edilen Sn-Zn alaşımlarına ait termal iletkenlik değerlerinden düşük çıktığı tespit edilmiştir. Dört nokta yönteminde yapılan ölçüm hataları Wiedemann-Franz [42] bağıntısından hesaplanan termal iletkenlik değerlerinin deneysel sonuçlardan düşük çıkmasının en önemli nedenlerinden birisidir. Ayrıca alaşımların entalpi ve özısılarının artan gümüş miktarı ile azaldığı tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında da görüldüğü gibi mikroyapı katılaştırma parametreleri ile, mekanik özelliklerde katılaştırma ve mikroyapı parametrelerinin değişimi ile kontrol edilmektedir. Dolayısıyla mikroyapı araştırmaları üzerine daha da yoğunlaşarak numunelerin fiziksel özellikleri daha da iyileştirilebilir.

Günümüzde alaşımların katılaştırılmasında pek çok yöntem kullanılmakta ve değişik süreçlere tabi tutulmaktadır. Gelecekte çok bileşenli alaşımlar farklı katılaştırma şartlarında üretilip farklı işlemlere tabi tutularak fiziksel özellikleri daha geniş bir perspektifte incelenebilir. Dolayısıyla hangi katılaştırma yöntemi ve katılaştırma sonrası işlemin hangi fiziksel özellik üzerinde etkili olduğu detaylı bir şekilde analiz edilebilir. Böylece üretilen alaşımların amaca uygun olarak optimizasyonu sağlanmış olacaktır.

## KAYNAKLAR

Ahmed, M., Fouzder, T., Sharif, A., Gain, A.K. and Chan, Y.C., “Influence of Ag micro-particle additions on the microstructure, hardness and tensile properties of Sn-9Zn binary eutectic solder alloy”, *Microelectron. Reliab.*, 50, 1134-1141, 2010a.

Ahmed, M., Fouzder, T., Sharif, A., Gain, A.K. and Chan, Y.C., “Influence of Ag micro-particle additions on the microstructure, hardness and tensile properties of Sn-9Zn binary eutectic solder alloy”, *Microelectronics Reliability*, 50, 1134-1141, 2010b.

Askeland D.R., 1990, The science and engineering of materials, Chapman and Hall. 218-233, London.

Bei, H. and George, E.P., “Microstructures and mechanical properties of a directionally solidified NiAl-Mo eutectic alloy”, *Acta. Mater.*, 53, 69-77, 2005.

Böyük, U. and Maraşlı, N., “The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn-Ag-Cu eutectic alloy”, *J. Alloy. Compd.*, 485, 264-269, 2009.

Böyük, U., Maraşlı, N., Çadırlı, E., Kaya, H. and Keşlioğlu, K., “Variations of microhardness with solidification parameters and electrical resistivity with temperature for Al-Cu-Ag eutectic alloy”, *Curr. Appl. Phys.*, 12, 7-10, 2012.

Bromley, J.F, Vnuk, F. and Smith, R.W., “Mechanical properties of the Sn-Ag<sub>3</sub>Sn alloys”, *J. Mater. Sci.*, 18, 3143-3153, 1983.

Cante, M.V., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., “The correlation between dendritic microstructure and mechanical properties of directionally solidified hypoeutectic Al-Ni alloys”, *Met. Mater. Int.*, 16, 39-49, 2010.

Chen, K.I., Cheng, S.C., Cheng, C.H., Wu, S., Jiang, L.Y. and Cheng, T.C., “The effects of gallium additions on microstructures and thermal and mechanical properties of Sn-9Zn solder alloys”, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-10, 2014.

Chen, K.I., Cheng, S.C., Wu, S. and Lin, K.L., “Effects of small additions of Ag, Al and Ga on the structure and properties of the Sn-9Zn eutectic alloy”, *J. Alloy. Compd.*, 416, 98-105, 2006.

Contieri, R.J., Lopes, E.S.N., Cruz, M.T., Costa, A.M., Afonso, C.R.M. and Caram, R., “Microstructure of directionally solidified Ti-Fe eutectic alloy with low interstitial and high mechanical strength”, *J. Cryst. Growth.*, 333, 40-47, 2011.

Çadırlı E., DPT Projesi, Ötektik altı Al-%3Si, ötektik Sn-Bi ve Sn-Cd ikili alaşımların bilgisayar kontrollü doğrusal katılaştırılması ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi, 2006, p.1-113.

Çadırlı, E., Büyük, U., Kaya, H. and Maraşlı, N., “Determination of mechanical, electrical and thermal properties of the Sn-Bi-Zn ternary alloy”, *J. Non-Cryst. Solids.*, 357, 2876-2881, 2011.

Çadırlı, E., Kaya, H. and Gündüz, M., “Effect of growth rates and temperature gradients on the lamellar spacing and the undercooling in the directionally solidified Pb-Cd eutectic alloy”, *Mat. Res. Bull.*, 38, 1457-1476, 2003.

Çadırlı, E., Kaya, H. and Gündüz, M., “Directional solidification and characterization of the Cd-Sn eutectic alloy”, *J. Alloy. Compd.*, 431, 171-179, 2007.

Daly, A.A. and Hammad, A.E., “Elastic properties and thermal behavior of Sn-Zn based lead-free solder alloys”, *J. Alloy. Compd.*, 505, 793-800, 2010.

Daly, A.A., Swilem, Y., Makled, M.H., Shaarawy, M.G. and Abdraboh, A.M., “Thermal and mechanical properties of Sn-Zn-Bi lead-free solder alloys”, *J. Alloy. Compd.*, 484, 134-142, 2009.

Das, S.K., Sharif, A., Chan, Y.C., Wong, N.B. and Yung, W.K.C., “Influence of small amount of Al and Cu on the microstructure, microhardness and tensile properties of Sn-9Zn binary eutectic solder alloy”, *J. Alloy. Compd.*, 481, 167-172, 2009.

Davies G.J., 1973, Solidification and casting, John Wiley and Sons, 55-59, New York.

El-Daly, A.A and Hammad, A.E., “Effects of small addition of Ag and/or Cu on the microstructure and properties of Sn-9Zn lead-free solders”, *Mater. Sci. Eng.*, A 527, 5212-5219, 2010a.

El-Daly, A.A. and Hammad, A.E., “Elastic properties and thermal behavior of Sn-Zn based lead-free solder alloys”, *J. Alloy. Compd.*, 505, 793-800, 2010b.

Elliot R., 1983, “Eutectic solidification processing crystal crystalline and glassy alloys”, Butterworths, 60-64, London

Fan, J., Li, X., Su, Y., Chen, R., Gou, J. and Fu, H., “Dependency of microstructure parameters and microhardness on the temperature gradient for directionally solidified Ti-49Al alloy”, *Mater. Chem. Phys.*, 130, 1232-1238, 2011.

Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J. and Fu, H., “Dependency of microhardness on solidification processing parameters and microstructure characteristics in the directionally solidified Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy”, *J. Alloy. Compd.*, 504, 60-64, 2010.

Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J. and Fu, H., “The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Ti-43Al-3Si alloy”, *J. Alloy. Compd.*, 506, 593-599, 2010.

Flemings, M.C., Döküm ve Katılaştırma Tekniği, Çev. Edt. Başaran, M., İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, 36-43, 88-90, 1976

Fouzder, T., Gain, A.K., Chan, Y.C., Sharif, A. and Yung, W.K.C., “Effect of nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additions on the microstructure, hardness and shear strength of eutectic Sn-9Zn solder on Au/Ni metallized Cu pads”, *Microelectronics Reliability*, 50, 2051-2058, 2010.

Gancarz, T., Fima, P. and Pstrus, J., “Thermal expansion, electrical resistivity and spreading area Sn-Zn-In alloys”, *JMEPEG.*, 23, 1524-1529, 2014.

Garcia, L.R., Osorio, W. R., Peixoto, L.C. and Garcia, A., “Mechanical properties of Sn-Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array”, *Mater. Charact.* 61, 212-220, 2010.

Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., “The effects of cell spacing and distribution of intermetallic fibers on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Fe alloys”, *Mater. Chem. Phys.*, 119, 272-278, 2010.

Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Osorio, W.R. and Garcia, A., “Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al-Si castings”, *Mater. Sci. Eng. A.*, 421, 245-253, 2006.

Guo, J. T., Xu, C. M., Du, X. H. and Fu, H. Z., “The effect of solidification rate on microstructure and mechanical properties of an eutectic NiAl-Cr(Mo)- Hf alloy”, *Mater. Lett.*, 58, 3233-3236, 2004.

Guoda, E., Mahasi, A., Hadadi, K. and Faeqeh, A., “Study the structure and electrical properties of Sn-9Zn-1Ag solder alloy”, *International Journal of Physics and Astronomy*, 2, 123-128, 2014.

Gündüz M., 1984, “The measurement of the solid-liquid energy”, Ph. D Thesis, Oxford University, 1-3, Oxford.

Gündüz, M. and Çadırılı, E., “Directional solidification of aluminium-copper alloys”, *Mater. Sci. Eng.*, A327, 167-185, 2002.

Gündüz, M., Kaya, H., Çadırılı, E. and Özmen A., “Interflake spacings and undercoolings in Al-Si irregular eutectic alloy”, *Mat. Sci. Eng A.*, 369, 215-229, 2004.

Hammam, M., Saad Allah, F., Gouda, E.S., Gendy, Y.E. and Aziz, H.A., “Structure and properties of Sn-9Zn Lead-free solder alloy with heat treatment”, *Engineering*, 2, 172-178, 2010.



Hu, X., Chen, W. and Wu, B., “Microstructure and tensile properties of Sn-1Cu lead-free solder alloy produced by directional solidification”, *Mater. Sci. Eng.*, A 556, 816-823, 2012.

Hung, F.Y., Wang, C.J., Huang, S.M., Chen, L.H., and Lui, T.S., “Thermoelectric characteristics and tensile properties of Sn-9Zn-xAg lead-free solders”, *J. Alloy. Compd.*, 420, 193-198, 2006.

Islam, R.A., Wu, B.Y., Alam, M.O., Chan, Y.C. and Jillek, W., “Investigations on microhardness of Sn-Zn based lead-free solder alloys as replacement of Sn-Pb solder”, *J. Alloy. Compd.*, 392, 149-158, 2005.

Jaafar, S., Kontrollü katılaşmış Al-Co ve Sn-Zn ötektik alaşımlarının mikroyapı parametreleri ile mekanik ve elektriksel özelliklerinin büyütme hızına bağımlılığının incelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, 2013.

Kamal, M. and Gouda, E.S., “Effect of rapid solidification on structure and properties of some lead-free solder alloys”, *Materials and Manufacturing Processes*, 21, 736-740, 2006.

Kamal, M., Meikhail, M.S., Bediwi., A.B. and Gouda, E.S., “Study of structural changes and properties for Sn-Zn<sub>9</sub> lead-free solder alloy with addition of different alloying elements”, *Radiation effects & Defects in solids*, 160, 45-52, 2005.

Kaya, H., Çadırılı, E., Büyük, U. and Maraşlı, N., “Variation of microindentation hardness with solidification and microstructure parameters in the Al based alloys”, *Appl. Surf. Sci.*, 255, 3071-3078, 2008.

Kim, Y.S., Kim, K.S., Hwang, C.W. and Suganuma, K., “Effect of composition and cooling rate on microstructure and tensile properties of Sn-Zn-Bi alloys”, *J. Alloy. Compd.*, 352, 237-245, 2003.

Kittel, C., ‘Introduction to Solid State Physics’; 6th Ed, John Wiley & Sons, New York, 178, 1965.

Klasik, A., Sobczak, N., Pietrzak, K., Makowska, K., Wojciechowski, A., Kudyba, A. and Sienicki, E., "Relationship between mechanical properties of lead-free solders and their heat treatment parameters", *JMEPEG.*, 21, 620-628, 2012.

Kumar, G.S., Prasad, G. and Pohl, R.O., "Review experimental determinations of the Lorenz number", *J. Mater. Sci.*, 28, 4261-4272, 1993.

Lee, J.E., Kim, K.S., Inoue, M., Jiang, J. and Suganuma, K., "Effects of Ag and Cu addition on microstructural properties and oxidation resistance of Sn-Zn eutectic alloy", *J. Alloy. Compd.*, 454, 310-320, 2008.

Liu, H.Y., Li, Y. and Jones, H., "Thermal stability of the  $\alpha$ Zn-Mg<sub>2</sub>Zn<sub>11</sub> and  $\alpha$ Zn- $\beta$ Al eutectics obtained by Bridgman growth", *J. Mater. Sci.*, 33, 1159-1164, 1998.

Matsugi, K., Sasaki, G., Yanagisawa, O., Kumagai, Y. and Fujii, K., "Electrical and thermal characteristics of Pb-free Sn-Zn alloys for an ac-low voltage fuse element", *Materials Transactions*, 48, 1105-1112, 2007.

Meydaneri, F., Saatçi, B., Gündüz, M. and Özdemir, M., "Determination of thermal conductivities of Sn-Zn lead-free solder alloys with radial heat flow and Bridgman-type apparatus", *Continuum Mech. Thermodyn.*, 25, 691-704, 2013.

Osorio, W. R., Peixoto, L.C., Garcia, L.R., Noel, N.M. and Garcia, A., "Microstructure and mechanical properties of Sn-Bi, Sn-Ag and Sn-Zn lead-free solder alloys", *J. Alloy. Compd.*, 572, 97-106, 2013.

Osorio, W.R. and Garcia, A., "Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn-Al alloys as a function of solidification conditions", *Mater. Sci. Eng. A.*, 325, 103-111, 2002.

Pietenpol, W.B. and Miley, H.A., "Electrical resistivities and temperature coefficients of lead, tin, zinc and bismuth in the solid and liquid states", *Physical Review*, 34, 1588-1600, 1929.

Poirier, D.R. and Geiger, G.H., Transport Phenomena in Materials Processing (Mineral, Metals and Materials Society, Warrendale, PA, 1994).

Porter D.A. and Easterling K.E., 1984, Phase transformation in metals and alloys, Van Nostrand and Reinhold, 1-17, New York.

Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. and Black, M., Handbook of induction heating, Markel Dekker Inc, Newyork 2003, pp 119e120.

Rutter J.W. and Chalmers B., 1953, “Prismatic substructure formed during solidification metals”, *Can. J. Physics*, 31, 15-39.

Saatçi, B., Maraşlı, N. and Gündüz, M., “Thermal conductivities of solid and liquid phases in Pb-Cd and Sn-Zn binary eutectic alloys”, *Thermochimica Acta*, 454, 128-134, 2007.

Santos, G.A., Neto, C.M., Osorio, W.R. and Garcia, A., “Design of mechanical properties of a Zn<sub>27</sub>Al alloy based on microstructure dendritic array spacing”, *Mater. Design.*, 28, 2425-2430, 2007.

Scheil, E., Retrograde saturation curves, *Z. Metallk.*, 34, 70-72, 1942.

Shafiq, I., Chan, Y.C., Wong, N.B. and Yung, W.K.C., “Influence of small Sb nanoparticles additions on the microstructure, hardness and tensile properties of Sn-9Zn binary eutectic solder alloy”, *J.Mater. Sci.-Mater. El.*, 23, 1427-1434, 2012.

Shalaby, R.M., “Effect of indium content and rapid solidification on microhardness and micro-creep Sn-Zn eutectic lead free solder alloy”, *Cryst. Res. Technol.*, 45, 4, 427-432, 2010.

Smiths, F.M., “Measurement of sheet resistivities with the four-point probe”, *Bell Syst. Technol. J.*, 37, 711, 1958.

Song, J.M., Lan, G.F., Lui, T.S. and Chen, L.H., “Microstructure and tensile properties of Sn-9Zn-xAg lead-free solder alloys”, *Scripta Materialia*, 48, 1047-1051, 2003.

Verhoeven D.J., 1975, Fundamentals of physical metallurgy, 217-229, New York.

Villian, J., Corradi, U. and Weippert, C., “Mechanical properties and microstructure of an eutectic Sn-Zn-solder alloy”, *University of Applied Sciences Augsburg*, 2008.

Voorhees P.W., Utilization of Space, AIAA , Springer, 2006.

Wenxue, C., Songbai, X., Hui, W. and Yuhua, H., “Effects of Ag on properties of Sn-9Zn lead-free solder”, *Rare Metal Mat. Eng.*, 39, 1702-1706, 2010.

West, D.R.F., Ternary Equilibrium Diagrams, 2nd Edn, Chapman and Hall, London, 1982.

Woodruff D.P., 1973, The solid- liquid interface, Cambridge Solid State Science series, 21-31, London

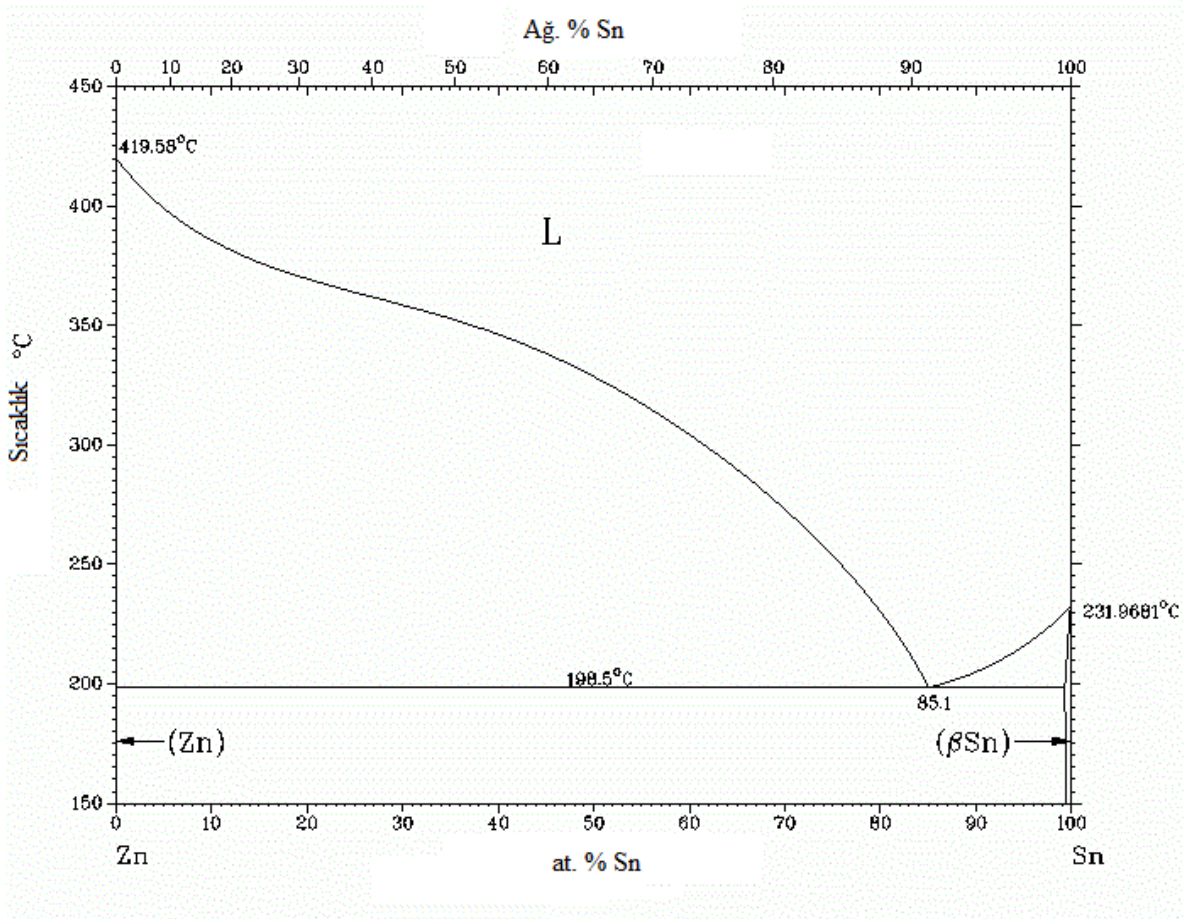
Wu, Y.K., Lin, K.L. and Salam, B., “Specific heat capacities of Sn-Zn based solders and Sn-Ag-Cu solders measured using differential scanning calorimetry”, *J. Electron. Mater.*, 38, 227-230, 2009.

Xiaowu, H., Ke, L. and Fanrong, A., “Research on lamellar structure and micro-hardness of directionally solidified Sn-58Bi eutectic alloy”, *China Foundry.*, 9, 360-365, 2012.

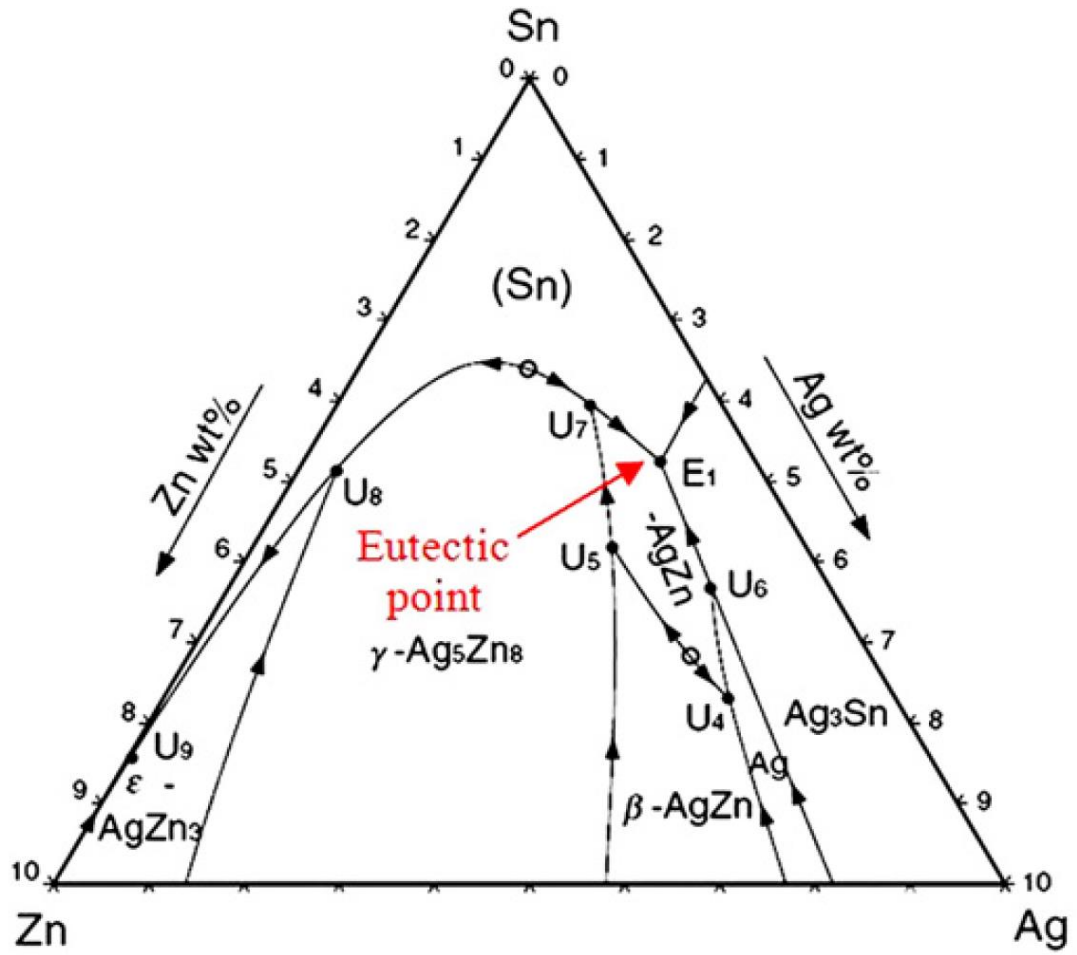
Yilmaz, F. and Elliott, R., “The Microstructure and mechanical properties of unidirectionally solidified Al-Si alloys”, *J. Mater. Sci.*, 24, 2065-2070, 1989.

## EKLER

### EK 1 Sn-Zn alaşımına ait faz diagramı



EK 2 Sn-Zn-Ag alaşımına ait faz diagramı



## **ÖZGEÇMİŞ**

Fatih KARAKURT 10.10.1974 tarihinde Kahramanmaraşta doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Kahramanmaraşta tamamladı. 1991 yılında girdiği Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümün'den haziran 1996'da mezun oldu. 1998 yılından bu yana Milli Eğitim Bakanlığına bağlı çeşitli okullarında öğretmenlik yapmaya devam etmektedir. 2013 yılında Niğde Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde yüksek lisansa başladı.