**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# FARKLI YÖN VE BÜYÜKLÜKTE UYGULANAN DÜZGÜN ELEKTRİK ALAN ALTINDA KATILAŞTIRILAN ALÜMİNYUM BAKIR VE ALÜMİNYUM NİKEL ÖTEKTİK ALAŞIMLARIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ELEKTRİK ALANA BAĞLILIKLARININ İNCELENMESİ

**Sercan BASİT**

DOKTORA TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Programı

Danışman

Prof. Dr. Necmettin Maraşlı

Temmuz, 2020

**T.C.**

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# FARKLI YÖN VE BÜYÜKLÜKTE UYGULANAN DÜZGÜN ELEKTRİK ALAN ALTINDA KATILAŞTIRILAN ALÜMİNYUM BAKIR VE ALÜMİNYUM NİKEL ÖTEKTİK ALAŞIMLARIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ELEKTRİK ALANA BAĞLILIKLARININ İNCELENMESİ

Sercan BASİT tarafından hazırlanan tez çalışması 03.07.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Üretim Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Necmettin Maraşlı
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Necip ÜNLÜ, Üye
İstanbulTeknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Cemalettin YAMAN
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Sezen AKSÖZ
Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Farklı Yön ve Büyüklükte Uygulanan Düzgün Elektrik Alan Altında Katılaştırılan Al-Cu ve Al-Ni Ötektik Alaşımların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Elektrik Alana Bağlılıklarının İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sercan BASİT

İmza

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Araştırma Destek Programları Başkanlığı (ARDEB) tarafından 118M695 koduyla desteklenmiştir.

*Çocuklarımın*

*annesi*

*biricik Eşim'e*

# TEŞEKKÜR

Tanıştığımız ilk günden bu güne kadar fikirleri, tavsiyeleri ve yönlendirmeleriyle çalışmalarımın gerek teorik gerekse pratik her aşamasında çok büyük katkısı olan, sadece akademik anlamda değil hayata dair de çok şey öğrendiğim gerçek bir bilim insanı, değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez ve proje çalışmalarım esnasında birlikte çalıştıığımız çalışma arkadaşım yüksek lisans öğrencisi Semih BİRİNCİ'ye, çalışmalarım sırasında maddi manevi desteklerini esirgemeyen laboratuarımız çalışanları Zeynep Sueda BASAR ve Arş. Gör. Ayşegül BİLEN'e, tezimin güzelleşmesinde çok büyük katkıları olan değerli öğrencilerimiz Kerem TİRYAKİ ve Berk ATALA'ya, tez çalışmalarıma maddi desteğini sunan Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (Proje no: 118M695), akademik hayatımın her alanında manevi desteklerini hissettiğim değerli aileme ve büyüklerime ve en önemlisi maddi manevi her zaman yanımda olan, bu zorlu süreçte bana sabırla katlanan, çocukarımın annesi biricik eşim Nagihan BASİT'e en içten en derin teşekkürlerimi sunarım.

Sercan BASİT

# İÇİNDEKİLER

**SİMGE LİSTESİ** ix

**KISALTMA LİSTESİ** xi

**ŞEKİL LİSTESİ** xii

**TABLO LİSTESİ** xvi

**ÖZET** xviii

**ABSTRACT** xx

**1 GİRİŞ** 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 6

**2 SIVI KATI DÖNÜŞÜMÜ VE KATILAŞTIRMA** 8

2.1 Giriş 8
2.2 Çekirdeklenme 8
2.2.1 Denge Kavramı ve Katı-Sıvı Faz Dönüşümlerinde Denge 9
2.2.2 Sürücü Kuvvet ve Alt Soğuma 11
2.2.3 Homojen Çekirdeklenme 13
2.2.4 Heterojen Çekirdeklenme 18
2.2.5 Ötektik Çekirdeklenme 21
2.3 Katılaştırma 22
2.3.1 Doğrusal Katılaştırma Sistemi 25
2.4 Ötektik Alaşımların Katılaştırılması 25
2.5 Ötektik Büyütmenin Teorik İncelenmesi 28
2.5.1 Jackson-Hunt, JH Teorik Modeli 29
2.5.2 Trivedi-Magnin-Kurz, TMK Teorik Modeli 32
2.5.3 Hunt-Lu, HL Teorik Modeli 33
2.5.4 Wilde-Froyen-Witusiewicz-Hecht, WFWH Teorik Modeli 34

2.6 Ötektik Yapıların Sınıflandırılması ..... 34
2.6.1 Normal Ötektikler ..... 36
2.6.2 Anormal Ötektikler ..... 38
2.7 Özet ..... 40
**3 DENEYSEL SİSTEM VE YÖNTEM 43**
3.1 Giriş ..... 43
3.2 Deneysel Sistem ..... 43
3.2.1 Vakumlu Alaşımlandırma Fırını ..... 43
3.2.2 Yüksek Durgun Elektrik Alan Altında Eksenel Katılaştırma Sistemi 45
3.2.3 Isıtma Bölgesi ..... 45
3.2.4 Silindirik Soğutma Sistemi ..... 49
3.2.5 Yüksek Durgun Elektrik Alan Uygulama Sistemi ..... 52
3.3 Deneysel Süreç ..... 61
3.3.1 Numunelerin Hazırlanması ..... 62
3.3.2 Alaşımların Yüksek Durgun Elektrik Alan Altında Katılaştırlması ..... 67
3.3.3 Numunelerin Hazırlanması ..... 71
3.3.4 Mikroyapıların Görüntülenmesi ve Ölçüm Yöntemleri ..... 76
3.3.5 Sertlik Ölçümleri ..... 78
3.3.6 Çekme Dayanımı Testi ..... 79
**4 SONUÇ VE ÖNERİLER 82**
4.1 Giriş ..... 82
4.2 Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni Sistemlerinde Mikroyapı Parametrelerinin Durgun Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 82
4.2.1 Al-Cu Ötektik Sisteminde Lamelsel Ötektik Mesafenin Durgun Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 82
4.2.2 Al-Ni Ötektik Alaşımında Çubuksal Yapıdaki Ötektik Mesafenin Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 90
4.2.3 Al-Cu Ötektik Alaşımında Tane Boyutunun Durgun Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 98

4.2.4 Al-Ni Ötektik Alaşımında Ötektik Tane Boyutunun Elektrik Alan Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 102

4.3 Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni Alaşım Sistemlerinde Sertlik ve Çekme Dayanım Özelliklerin Durgun Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 108

4.3.1 Al-Cu Ötektik Alaşımında Sertlik Değerlerinin Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 108

4.3.2 Al-Ni Ötektik Alaşımında Sertliğin Elektrik Alan Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 110

4.3.3 Al-Cu Ötektik Alaşımında Çekme Mukavemetinin Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 115

4.3.4 Al-Ni Ötektik Alaşımında Nihai Gerilme Mukavemetinin Elektrik Alan Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı ..... 118

4.4 Genel Sonuçlar ve Öneriler ..... 123

**KAYNAKÇA** **126**

**TEZDEN ÜRETILMIŞ YAYINLAR** **134**

# SİMGE LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $C_0$ | Alaşımın başlangıç bileşimi(%ağ) |
| $\Delta T$ | Alt Soğuma(K) |
| Al | Alüminyum |
| $\gamma$ | Arayüzey Serbest Enerjisi(J) |
| Cu | Bakır |
| P | Basınç($N/mm^2$) |
| $\Delta g_v$ | Birim Hacim Başına Düşen Serbest Enerji Değişimi(J) |
| d | Brinelll Sertlik İz Çapı(m) |
| I | Çekirdeklenme Hızı(atom/s) |
| $\sigma$ | Çekme Dyanımı(MPa) |
| $\Delta T_s$ | Çözünürlük Alt Soğuması(K) |
| m | Eğim |
| $\Delta T_r$ | Eğrilik Alt Soğuması(K) |
| E | Elektrik Alan(kV/cm, V/μm) |
| H | Entalpi(J) |
| S | Entropi(J/K) |
| $H_f$ | Ergime ısısı(J) |
| G | Gibbs Serbest Enerji(J) |
| $\Delta G$ | Gibbs Serbest Enerji Değişimi(J) |
| $\Gamma$ | Gibbs-Thomson Katsayısı |
| $f$ | Hacim Kesri |
| U | İç Enerji(J) |
| Sn | Kalay |
| $\gamma_{kp}$ | Katı-Partikül Arayüzey Enerjisi($J/m^2$) |
| V | Katılaştırma Hızı(K/m) |
| $\mu$ | Kimyasal Potansiyel |
| $\Delta T_k$ | Kinetik Alt Soğuması(K) |
| $r^*$ | Kritik Yarıçap(m) |
| Pb | Kurşun |
| X | Lamellerin Toplam Genişliği(μm) |
| d | Mesafe(mm,m) |

| | |
|---|---|
| $n$ | Mol Sayısı |
| $g$ | Molar Gibbs Serbest Enerji(J/mol) |
| $E_-$ | Negatif Yönlü Elektrik Alan(kV/cm, V/μm) |
| $\lambda_{ort}$ | Ortalama Ötektik Mesafe(μm) |
| $\lambda$ | Ötektik Mesafe(μm) |
| $P$ | Peclet Sayısı |
| $E_+$ | Pozitif Yönlü Elektrik Alan(kV/cm, V/μm) |
| $T$ | Sıcaklık(K) |
| $G$ | Sıcaklık Gradyenti(K/m) |
| $\gamma_{sk}$ | Sıvı-katı Arayüzey enerjisi($J/m^2$) |
| $\gamma_{sp}$ | Sıvı-partikül Arayüzey Enerjisi($J/m^2$) |
| $\theta$ | Temas Açısı($^0$) |
| $N_L$ | Toplam Lamel Sayısı |
| $R$ | Universal Gaz Sabiti(8,31J/molK) |
| $r$ | Yarıçap(m) |

# KISALTMA LİSTESİ

| | |
|---|---|
| ağ. | Ağırlıkça |
| at. | Atomik |
| HB | Brinell Sertlik |
| GS | Grain Size |
| HMK | Hacim Merkezli Kübik |
| HSP | Hegzagonal Sıkı Paket |
| HF | Hidroflorik asit |
| NÇM | Nihai Çekme Mukavemeti |
| $HNO_3$ | Nitrik asit |
| ÖTB | Ötektik Tane Boyutu |
| UTS | Ultimate Tensile Stress |
| HV | Vickers Sertlik |
| HB | Briunel Sertlik |
| YMK | Yüzey Merkezli Kübik |

# ŞEKİL LİSTESİ

**Şekil 2.1** Atom dağılımlarına göre sistemin Gibbs serbest enerjisinin değişimi [22] ..... 11

**Şekil 2.2** İki faz için Gibbs serbest enerjinin sıcaklıkla değişimi; $G_s$:sıvı faz, $G_k$:katı faz[22] ..... 12

**Şekil 2.3** Homojen çekirdeklenme için varsayılan küresel katı embriyo oluşumu şematik gösterimi ..... 14

**Şekil 2.4** Katı-sıvı sisteminin toplam serbest enerjisi katı maddenin boyutuna göre değişimi. Yatıçap kritik yarıçaptan küçükse embriyo, yarıçap kritik yarıçaptan büyükse katı bir çekirdektir [25], [28] ..... 15

**Şekil 2.5** Heterojen çekirdeklenme şematik gösterimi ..... 19

**Şekil 2.6** Şekil faktörünün temas açısına göre değişimi ..... 20

**Şekil 2.7** Temas açısının etkisini gösteren çekirdeklenme hızının alt soğma ile değişimi [25] ..... 21

**Şekil 2.8** Doğrusal katılaştırma dizaynı şematik gösterim [58] ..... 25

**Şekil 2.9** Ötektik bileşimdeki bir alaşımın katılaştırılması ve ötektik mikroyapısı şematik gösterimi [28] ..... 26

**Şekil 2.10** Lamelsel mikroyapıdaki ötektik büyümenin şematik gösterimi [55] . 28

**Şekil 2.11** Ötektik büyümedeki temas açıları şematik gösterimi ..... 30

**Şekil 2.12** JH modeline göre altsoğuma ile lamel mesafeler arasındaki ilişki, a)eğrilik ve çözünürlük farkının tesiri, b) değişen soğutma hızlarında lamel aralıkların değişimi [55] ..... 31

**Şekil 2.13** Sabit bir katılaştırma hızı için altsoğuma ve ötektik mesafe ilişkisi, kararlı-kararsız bölgeler [55] ..... 32

**Şekil 2.14** Lamelsel mikroyapıya örnek Al-%33Cu ötektik alaşımının sem görüntüsü [42] ..... 37

**Şekil 2.15** Çubuksal mikroyapı örneği, NiAl-9Mo alaşımının sem görüntüsü [71] ..... 38

**Şekil 2.16** Bazı anormal ötektiklere ait örnek görüntüler, a) kesikli lamelsel yapı(Sn-Zn)[75] b) Düzensiz fleyk yapı (Al-Si)[76] c) yarı düzenli yapı(Bi-Sn) [77] ..... 39

**Şekil 3.1** Vakum altında ergitme fırını şematik gösterim ve resmi ..... 44

**Şekil 3.2** Direnç telleri, seramik boncuklar ve alümina tüp kullanılarak hazırlanan ısıtıcı bölge ..... 46

**Şekil 3.3** Elektrik alan deneylerinde kullanılan ısıtıcı fırın, şematik gösterimi ve resmi ..... 47

**Şekil 3.4** Deneylerde kullanılan termal çiftler ve ısıtıcı fırına entegresi ..... 48

**Şekil 3.5** Fırın stabilizasyonunda kullanılan seyyar sıcaklık okuyucu ..... 48

**Şekil 3.6** Isıtıcı fırın ve kontrol düzeneği ..... 49
**Şekil 3.7** Ar-ge çalışmaları sırasında dizayn edilen soğtuma sisteminin ilk hali50
**Şekil 3.8** Silindirik tankın fırın içindeki konumu ..... 50
**Şekil 3.9** Sistemde kullanılan su soğutmalı silindirik tank ..... 51
**Şekil 3.10** Deneysel çalışmanın başlarında kullanılan 6kV çıkışa sahip DC güç kaynağı ..... 53
**Şekil 3.11** Ar-ge faaliyetleri sırasında kurulumu yapılan ilk elektrik alan sistemi ..... 54
**Şekil 3.12** Ar-ge faaliyetleri sırasında kurulumu yapılan bir diğer elektrik alan sistemi ..... 55
**Şekil 3.13** Ar-ge faaliyetleri sırasında kurulumu yapılan mermer çerçeveli bir diğer elektrik alan sistemi ..... 56
**Şekil 3.14** Ar-ge süreci içerisinde kullanımına karar verilen bir sistemin son hali ..... 56
**Şekil 3.15** Statik elektrik alanı altında yönlü katılaşma için deneysel kurulum... 58
**Şekil 3.16** Özel üretim DC yüksek gerilim kaynağı ..... 59
**Şekil 3.17** Elektrik alan mesafesini ayarlamada kullanılan düzenek..... 60
**Şekil 3.18** Farklı yön ve büyüklüklerde elektrik alan atında yapılan katılaştırma deney düzeneği ..... 61
**Şekil 3.19** Alaşım hazırlamada ve elektrik alan deneylerinde kullanılan potaların işlendiği grafit çubuklar ..... 63
**Şekil 3.20** Sıvı alaşımların hazırlanmasında kullanılan grafit pota..... 64
**Şekil 3.21** Ergiyik alaşımların elektrik alan altında katılaştırılmasında kullanılan özdeş potaların şematik çizimi ve resmi..... 65
**Şekil 3.22** Örnek Al-Cu faz diyagramı [89]..... 66
**Şekil 3.23** Örnek Al-Ni faz diyagramı [90] ..... 66
**Şekil 3.24** Pozitif durgun elektrik alan uygulamasıyla sıvı atom ve moleküllerin yüklenmesi ve atomik kütle transferini anlatan şematik gösterim..... 68
**Şekil 3.25** Negatif durgun elektrik alan uygulamasıyla sıvı atom ve moleküllerin yüklenmesi ve atomik kütle transferini anlatan şematik gösterim..... 69
**Şekil 3.26** Katılaştırma deneyleri sonucu elde edilen bir numune örneği ..... 70
**Şekil 3.27** Deneysel çalışmalarda kullanılan hassas kesici..... 72
**Şekil 3.28** Metalografik işlemler için montelenmiş numuneler..... 73
**Şekil 3. 29** Farklı aşındırıcı boyutlarındaki SiC zımpara kağıtları ..... 73
**Şekil 3.30** Zımparalama ve parlatma işlemlerinde kullanılan otomatik yüzey hazırlama cihazı..... 74
**Şekil 3.31** Parlatma işlemlerinde kullanılan süspansiyonlar ve özel çuhaları..... 75
**Şekil 3.32** Ötektik lameller arası mesafe ölçümleri şematik gösterimi ..... 76

**Şekil 3.33** Ötektik çubuk(rod) mesafelerin ölçümü şematik gösterim ..... 77

**Şekil 3.34** Standartlara uygun çekme numunesi ölçüleri..... 79

**Şekil 3.35** Çekme testleri için hazırlanan numuneler; (a) işlenmeden önce, (b) işlenmiş numune, (c) çekme testine tabi tutulmuş numune..... 80

**Şekil 3.36** Çekme testlerinin gerçekleştirildiği çekme cihazı ..... 81

**Şekil 4.1** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımının tipik mikroyapı optik görüntüleri; (a) elektrik alansız, (b) 8,1kV/cm, (c) 8,8kV/cm ve (d) 10,0kV/cm..... 83

**Şekil 4.2** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tipik mikroyapı optik görüntüleri; (a) elektrik alansız, (b) 7,8kV/cm, (c) 8,9kV/cm ve (d) 10,2kV/cm..... 84

**Şekil 4.3** Al-Cu ötektik alaşımında lameller arası mesafenin farklı yön ve büyüklükte uygulanan durgun elektrik alana bağlı değişimi ..... 87

**Şekil 4.4** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tipik mikroyapı optik görüntüsü; (a) elektrik alnsız, (b) 8 kV/cm, (c) 9 kV/cm ve (d) 10 kV/cm..... 90

**Şekil 4.5** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tipik mikroyapı optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 8 kV/cm, (c) 9kV/cm ve (d) 10kV/cm..... 91

**Şekil 4.6** Al-Ni ötektik alaşımında ötektik mesafenin farklı yön ve büyüklükte uygulanan durgun elektrik alana bağlı değişimi ..... 93

**Şekil 4.7** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tane boyutu optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 8,1 kV/cm, (c) 8,8 kV/cm ve (d) 10,0 kV/cm..... 99

**Şekil 4.8** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tane boyutu optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 7,8 kV/cm, (c) 8,9 kV/cm ve (d) 10,2 kV/cm.....100

**Şekil 4.9** Al-Cu alaşımında ötektik tane boyutunun durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi.....102

**Şekil 4.10** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tane boyutu optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 8 kV/cm, (c) 9 kV/cm, (d) 10 kV/cm .....103

**Şekil 4.11** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tane boyutu optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 8 kV/cm, (c) 9 kV/cm, (d) 10 kV/cm .....104

**Şekil 4.12** Al-Ni alaşımında ötektik tane boyutunun durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi.....106

**Şekil 4.13** Al-Cu ötektik alaşımında sertlik değerlerinin durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi.....110

**Şekil 4.14** Al-Ni ötektik alaşımında sertlik değerlerinin durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi.....112

**Şekil 4.15** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın gerilme-gerinim eğrileri ..... 115

**Şekil 4.16** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın gerilme-gerinim eğrileri ..... 116

**Şekil 4.17** Al-Cu ötektik alaşımında nihai çekme mukavemeti değerlerinin durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi ..... 117

**Şekil 4.18** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın gerilme-gerinim eğrileri ..... 118

**Şekil 4.19** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın gerilme-gerinim eğrileri ..... 119

**Şekil 4.20** Al-Ni ötektik alaşımında nihai çekme mukavemeti değerlerinin durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi ..... 120

# TABLO LİSTESİ

**Tablo 3. 1** Kullanılan morgan marka garafitlerin bazı fiziksel özellikleri ..... 63

**Tablo 4.1** Farklı büyüklükte uygulanan pozitif elektrik alan altında katılaştırılmış Al-Cu ötektik alaşımında ölçülen ötektik lameller arası mesafe ..... 85

**Tablo 4.2** Farklı büyüklükte uygulanan negatif elektrik alan altında katılaştırılmış Al-Cu ötektik alaşımında ölçülen ötektik lameller arası mesafe ..... 85

**Tablo 4.3** Al-Cu ikili veya üçlü ötektikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen lameller arası mesafenin katılaşma hızına ve elektriak alana bağılığını tanımlayan bağıntıları ..... 89

**Tablo 4.4** Farklı büyüklükte uygulanan pozitif elektrik alan altında katılaştırılmış Al-Ni ötektik alaşımında ölçülen ötektik mesafeler ..... 92

**Tablo 4.5** Farklı büyüklükte uygulanan negatif elektrik alanaltında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımında ölçülen ötektik mesafeler ..... 92

**Tablo 4.6** Al-Ni ikili veya üçlü ötektikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen ötektik mesafenin katılaşma hızına ve elektrik alana bağılığını tanımlayan bağıntıları ..... 95

**Tablo 4.7** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tane boyutu ölçümleri ..... 100

**Tablo 4.8** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tane boyutu ölçümleri ..... 101

**Tablo 4.9** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tane boyutu ölçümleri ..... 105

**Tablo 4.10** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tane boyutu ölçümleri ..... 105

**Tablo 4.11** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın sertlik ölçümleri ..... 108

**Tablo 4.12** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın sertlik ölçümleri ..... 109

**Tablo 4.13** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın sertlik ölçümleri ..... 111

**Tablo 4.14** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın sertlik ölçümleri ..... 111

**Tablo 4.15** Al-Cu ve Al-Ni ikili veya üçlü ötektikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen mikrosertliğin katılaştırma hızına ve uygulanan alana bağılığını tanımlayan bağıntıları ..... 114

**Tablo 4.16** Farklı yön ve büyüklükte uygulanan elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik numunelerin nihai çekme mukavemetleri ..... 116

**Tablo 4.17** Farklı yön ve büyüklükte uygulanan elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik numunelerin nihai çekme mukavemetleri ..... 119

**Tablo 4.18** Al-Cu ve Al-Ni ikili veya üçlü ötektikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen çekme dayanımlarının katılaştırma hızına ve uygulanan alana bağılığını tanımlayan bağıntıları.....122

# ÖZET

## FARKLI YÖN VE BÜYÜKLÜKTE UYGULANAN DÜZGÜN ELEKTRİK ALAN ALTINDA KATILAŞTIRILAN ALÜMİNYUM BAKIR VE ALÜMİNYUM NİKEL ÖTEKTİK ALAŞIMLARIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ELEKTRİK ALANA BAĞLILIKLARININ İNCELENMESİ

Sercan BASİT

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Son yıllarda metalik malzemelerin özelliklerinin ileri taşınması için mevcut katılaşma parametrelerinin (bileşim$C_0$, sıcaklık gradyenti$G$ ve katılaştırma hızı$V$) dışında katılaşmaya etki edecek başka dış parametreler araştırılmaktadır. Yapılan çalışmalara göre dış parametre olarak göz önüne alınan elektromanyetik alan, elektrik akımı, elektrik akım pulsu gibi yöntemlerin malzemenin mikroyapısına etki ettiği bildirilmiştir.

Bu çalışmada mikroyapısı çok iyi bilinen eriyik Al-Cu ve Al-Ni ötektik alaşımları herhangi bir elektrik pulsu, elektrik arkı ve elektrik akımı oluşturmaksızın katılaştırma yönüne paralel ve antiparalel yönlerde, farklı büyüklüklerde (6–10 kV $cm^{-1}$) düzgün elektrik alan altında katılaştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle yenilikçi,

bir katılaşma sisteminin tasarımı yapılmıştır. Söz konusu alaşımlar bu deneysel sistem kullanılarak katı-sıvı arayüzeyin büyüme yönünde ($E_+$) ve bu yöne ters ($E_-$) olacak şekilde yüksek elektrik alan altında katılaştırılmıştır. Durgun elektrik alan altında katılaştırılan numunelerden ötektik measfe ($\lambda$), ötektik yapının tane boyutu (ÖTB), sertlikler (HB) ve nihai çekme mukavemeti (NÇM) incelenmiş ve bunların elektrik alanın yönü ve büyüklüğü ile nasıl değiştiği lineer regrasyon analizleri ile ortaya konmuştur.

Durgun elektrik alanın farklı yön ve büyüklükleri altında katılaştırılan Al-Cu ve Al-Ni alaşımlarının mikroyapı, mekanik özellikleri analizlerinden elde edilen önemli bulgular şu şekildedir. Uygulanan yüksek voltaj etkisiyle eriyik atomlar ve moleküller pozitif yükle yüklenirler bununla birlikte metalik eriyik atomları doğrudan voltaj uygulamasından önce topraklanarak en yüksek enerji seviyelerindeki elektron veya elektronları kaybederek pozitif yükle yüklenirler. Uygulanan elektrik alan yüklü sıvı atomlar ve moleküller üzerinde bir elektrik alan kuvveti oluşturur. Bu oluşan kuvvet, uygulanan yöne bağlı olarak sıvıdan katıya geçen atom ve molekül sayısında bir artışa veya azalmaya sebep olur. Buna bağlı olarak uygulanan pozitif($E_+$) ve negatif($E_-$) elektrik alan malzemede ötektik mesafe, tane boyutları gibi mikroyapı parametrelerini, sertlik ve gerilme mukavemeti gibi mekanik özellikleri artırmış ve azaltmıştır. Yapılan analizlerden elektrik alan katılaşma yönüne paralel ve anti paralel olarak uygulandığında mikroyapıya ve diğer mekanik özelliklere çift yönlü bir etki oluşturduğu gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Katılaşma, elektrik alan, ötektik alaşım, ötektik mesafe.

# ABSTRACT

## INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES DEPENDENCES ON ELECTRICAL FIELD FOR ALUMINIUM COPPER AND ALUMINIUM NICKEL ALLOYS SOLIDIFIED UNDER DIFFERENT DIRECTION AND MAGNITUDE OF ELECTRIC FIELD

Sercan BASİT

Department of Metallurgical and Material Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Nowadays, in order to carry the properties of metallic materials forward, external parameters which is affect the solidification are investigated apart from the existing solidification parameters(composition $C_0$, temperature gradient G and solidificationrate V). According to recent studies, it has been reported that methods such as electromagnetic field, electric current, electric current pulse affect the microstructure of the material.

In this study, the well-known molten Al-Cu and Al-Ni eutectic alloys were solidified under uniform electric field in different directions(±y) and magnitude (6-10 kV/cm) without generating any electric pulses, electric arc and electric current. For this purpose, an innovative solidification apparatus was designed to solidify the alloys under uniform high electric field. The alloys in questions were solidified under high electric field in this apparatus, in the direction of growth and reverse of the solid-liquid interface. As a control sample, the samples were solidified without electric

field by maintaining the same solidification conditions from each group. Eutectic gaps(λ), grain size(GS), hardness(HB) and ultimate tensile strength(UTS) of the eutectic structure were examined and how they changed with the direction and magnitude of the electric field was revealed by linear regression analysis.

The important findings obtained from microstructure, hardness and ultimate tensile strength analysis of Al-Cu and Al-Ni alloys solidified under different directions and magnitude of the static electric field are as follows. The applied electric field generates an electric field force on liquid atoms and molecules. This generated force causes an increase or decrease in the number of atoms and molecules passing from liquid to solid depending on the applied direction. Accordingly, electrical field applied in positive($E_+$) and negative($E_-$) increased and decreased the microstructure parameters such as eutectic gaps, grain sizes and mechanical properties such as hardness and tensile strength.

**Keywords:** Solidification, electric field, eutectic alloys, eutectic spacing

# 1
# GİRİŞ

## 1.1 Literatür Özeti

Malzemelerin mikroyapılarındaki değişiklikler mekanik özelliklerini (sertlik, çekme-basma dayanımı, % uzama gibi), elektriksel- termal özelliklerini ve korozyon özelliklerini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Malzemelerde istenilen mikroyapıların oluşturulması, mikroyapının düzenlenmesi ve faz boyutlarının($\lambda$) belirlenmesi katılaştırılmaları sırasında katılaştırma parametreleri olarak adlandırılan; alaşım bileşimine $C_0$, sıcaklık gradyentine G ve katılaştırma hızına V doğrudan bağlıdır. Yani katılaştırma parametreleri olan $C_0$ , G, ve V ayrı ayrı kontrol edilerek alaşımların mikroyapılarını dolayısıyla diğer özelliklerini belirlemek kontrollü katılaştırma yöntemi ile mümkündür.

Saf bir metale uygun bir alaşım elementi ilavesi ile büyük ölçüde mekanik özellikleri değiştirilebilir [1]. Metalik malzemeler bünyesinde bulundurduğu elementlerin yapı içerisindeki karışım durumuna göre tek fazlı veya çok fazlı olarak ikiye ayrılırlar. Birbiri içinde her oranda karışan elementlerden teşekkül eden alaşımlar tek fazlı sistem olarak adlandırılırlar. Bu tür bir alaşımda alaşım elementlerinden biri diğer elementin kristal örgüsüne yerleşir ve alaşımın örgü sistemi değişmiş olur. Yeni örgü içinde farklı özelliklere sahip atomların varlığından kaynaklı alaşım farklı özellikler gösterir [2], [3].

Alaşımların düzlemsel cephede kontrollü şekilde katılaştırılması istenilen özellik ve morfolojide malzeme üretimine verdiği imkan sayesinde çok önemlidir. Bu yöntem pratikte homojen bileşim elde etmede, malzemelerin saflaştırılmasında ve tek kristal büyütmesinde kullanılır. Endüstriye bakan yönüyle de düşünüldüğünde ötektik ve ötektik bileşime yakın alaşımlar çalışmalarda önemli bir yer kaplamaktadırlar. Ötektik, bir sistemde $\alpha$ ve $\beta$ katı fazlarının yanında sıvı fazın da dengede bulunduğu üçlü bir bölgedir[3]. Ötektik sistemlerde katılaştırma parametrelerinin (bileşim, sıcaklık gradyenti, katılaştırma hızı) mikroyapı ve

dolayısıyla mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi üzerine bir çok araştırma yapılmıştır.

Jordan ve Hunt[4], yaptıkları çalışmada Bridgman tipi katılaştırma fırını kullanmışlardır. Farklı bileşimlerde hazırladıkları Pb-Sn ve Al-Cu alaşımlarını fırına senkronize bir motorla sıcak bölgeden su soğutmalı soğuk bölgeye çekerek katılaştırmışlar ve ani soğutma ile katılaştırmayı tamamlamışlardır. Deneyler Pb-Sn için 100-150 $^0$C/cm, Al-Cu için 185-260 $^0$C/cm sıcaklık gradyenti aralığında ve tüm deneyler için büyütme hızı 0,0011-0,025mm/s aralığında seçilmiştir. Kontrollü doğrusal katılaştırma sayesinde büyütme hızı ve sıcaklık gradyentinin malzemenin mikroyıpısını nasıl etkilediği gözlenmiştir.

Piatti ve Pellegrini[5] 'nin çalışmasında Al-%4-10Pt(ağ.) bileşimlerinde alaşımlar koruyucu atmosfer altında ince grafit potalara doldurulmuştur. Bu numuneler 100$^0$C/cm sıcaklık gradyentinde ve 0,0028-0,123mm/s aralığında büyütme hızında kontrollü katılaştırma fırınında katılaştırılmış ve elde edilen deneysel sonuçlardan $\lambda=kV^{-0,45}$ ($k=2,5\mu m^{1,45} s^{-0,45}$) bağıntısı bulunmuştur.

Çadırlı ve ark[6], ötektik bileşime sahip Al-%33Cu(ağ.) alaşımı vakumlu ergitme fırında hazırlamışlardır. Elde edilen alaşımlar 4mm iç çap, 6,4mm dış çapında ve 200mm uzunluğunda grafit kalıplara doldurulmuştur. Elde edilen deney numuneleri koruyucu atmosfer altında (argon) kontrollü doğrusal katılaştırma fırınında 0,0095-0,483mm/s arasında değişen büyütme hızlarında ve 58,4 $^0$C/cm sıcaklık gradyentinde katılaştırılmış ve mikroyapı parametreleri tespit edilmiştir.

Bir başka ötektik çalışmada ise yüksek saflıktaki (99,99) metallerle ötektik bileşimde hazırlanan Al-Si alaşımında sabit büyütme hızlarında, farklı sıcaklık gradyentinde ve sabit sıcaklık gradyentinde, farklı büyütme hızlarında mikroyapı parametresi olan $\lambda$'nın değişimi incelenmiştir. Deneysel sonuçlardan $\lambda$ ve büyütme hızı arasında bağıntılar kurulmuştur. Elde edilen bağıntılar artan büyütme hızıyla beraber ötektik mesafenin azaldığını göstermektedir [7].

De Wilde ve arkadaşları[8], iki farklı bileşimde yaptıkları katılaştırma deneylerinde düzlemsel ötektik yapıda mikroyapılar tespit etmişlerdir. Al-%25,6Cu-%15,2Ag ve Al-%24,8Cu-%24,5Ag(ağ.) noktalarında yapılan deneyler sonucunda ötektik sıvıdan

$\alpha$(Al) ve $\theta$($Al_2Cu$) şeklinde iki ayrı intermetalik faz elde ettiler. Her iki bileşimdeki katılaştırma çalışmalarında da büyütme hızı ve ötektik mesafeler($\lambda$) arasında '$\lambda^2V$= sabit' eşitliğinin sağlandığını göstermişlerdir.

Böyük ve Maraşlı[9], yaptıkları çalışmada Sn-Ag-Cu alaşımını ötektik bileşimde (Sn-%3,5Ag(Ağ)-%0,9Cu(Ağ)) vakumlu ergitme fırınında hazırlayarak hazırlanan alaşımı 4mm iç çap, 6,4mm dış çap ve 200mm uzunluğunda grafit kalıplara doldurmuşlardır. Bu numuneleri Bridgman tipi kontrollü katılaştırma fırınında argon gazı ortamında G=2,48K/mm sabit sıcaklık gradyentinde ve 0,00389-0,17361mm/s arasında değişen büyütme hızlarında katılaştırarak ani soğutma yapmışlardır. Bu numunelerden elde edilen sonuçlarla mikroyapı parametreleriyle katılaştırma parametreleri arasındaki ilişkileri ortaya koymuşlardır.

Yılmaz ve Elliot[10], yaptıkları çalışmada yüksek saflıktaki (%99,999) Al ve Si metallerinden koruyucu atmosfer altında Al-%14-17Si(ağ.) bileşimlerinde alaşımları hazırlamışlar ve kontrollü katılaştırma fırınında doğrusal olarak katılaştırmışlardır. Katılaştırma parametrelerini $125^0$C/cm sıcaklık gradyenti ve 0,001-1,500mm/s büyütme hızı olarak belirlemişlerdir. Farklı katılaştırma şartları sonucu gözlemledikleri farklı mikroyapıların (köşeli, fleyk, lifli ve karışık düzenli) mikrosertlik ölçümlerini yapmışlardır. Araştırmacılar ulaştıkları deneysel sonuçları kullanarak mikrosertlik (HV) ile büyütme hızı(V) arasında HV=H0 + kVm (m=0,04) tipinde bağıntı elde etmişlerdir. Aynı zamanda çalışmada mikrosertlik ile mikroyapı parametresi ($\lambda$) arasında ise HV= H0 + k$\lambda$-nE (köşeli sislisyum yapı için n=0,50, lifli, fleyk ve karışık düzenli yapı için n=0,08) şeklinde bağıntılar elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmalarda bilim insanları en etkili parametrenin büyütme hızı olduğunu rapor etmeleriyle beraber mevcut katılaşma parametreleri olan bileşim, sıcaklık gradyenti ve büyütme hızı etkilerinin malzemenin özelliklerini geliştirmede sınırlı kaldığını gözlemledikten sonra bu parametrelerin dışında uygulanabilecek başka etki parametreleri arayışına girmişlerdir. Bu amaçla son dönemlerde manyetik alan, elektromanyetik alan, manyetik puls, AC ve DC akımı, elektrik pulsu ve elektrik alan gibi parametrelerin katılaştırmaya dolayısıyla malzeme özelliklerine doğrudan etki etme yetileri çalışılmaktadır. Bu konuda yapılan bazı çalışmalar ise şöyledir.

Wheeler ve ark[11], ergiyik bir alaşımdan elektrik akımı geçirmenin önemli bir sonucunun elektromigrasyon olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumda oluşan elektrik alan katı-sıvı arayüzeydeki konsantrasyon dağılımını kontrol edebilme fikri doğurur. Böylece bu mekanizmanın (uygun bir elektrik alan değeri seçildiğinde) sistemi stabilize etmek için kullanılabileceğini iddia etmişlerdir.

Li ve ark[12], Al-Si ötektik alaşımına uyguladıkları düşük voltaj pulslu manyetik alanın alaşımın ötektik morfolojisini önemli ölçüde değiştirdiğini belirtmişlerdir. Çalışmaya göre manyetik alan Al-Si ötektiğinin eşli büyümesinin ortadan kaldırıp nispeten düşük büyüme hızlarında(≤1μm/s) $\alpha$-Al ve Si dendrit yapısının ayrılmasına sebep olmuştur. Ayrıca manyetik alanın ilk büyüme esnasında, taneleri inceltiği ve ötektik mesafeyi düşürdüğü belirtilmiştir. Bunun yanında uygulanan alan etkisi ötektik içerisinde $\alpha$-Al fazının eş eksenli sutünlara dönüşümünü sağlamıştır. Manyetik alan şiddeti arttıkça sayılan tüm bu özelliklerde artış gözlenmiştir.

Yapılan bir başka çalışmada[13], elektrik alan pulsunun Fe bazlı alaşımlarda alaşım elementlerinin dağılımı ve göçü üzerine etkisi incelenmiştir. Edinilen bulgular sonucunda uygulanan elektrik alan pulsunun alaşım elementlerinin hem dağılımını hem de göçünü değiştirdiği bulunmuştur.

Elektrik pulsu ve manyetik alan pulsun birlikte uygulandığı ve elektromanyetik pulsun malzemelerin mikroyapısı üzerine etkisi Manuwong tarafından incelenmiştir [14]. Araştırmacı bu çalışmasında yapıda tane inceltilmesinde ve çözünen difüzyonunun artırılmasında Lorentz kuvvetinin ve manyetik akının baskın parametreler olduğunu iddia etmiştir.

Zhong ve ark[15], Yüksek statik manyetik alan ve alternatif akımı birlikte uygulayarak biribiri içinde karışmayan alaşımın (Zn-%30Bi(Ağ)) katılaşma sürecine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada doğru seçilmiş elektrik-manyetik alan değerlerinde katılaştırılmış alaşımlarda makrofaz ayrımı olmaksızın bir mikroyapı gösterebileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışma için 85N/cm$^3$ ve 50Hz frekanslı elektrik-manyetik kuvvet değerleri altında homojen katı yapıya ulaşmışlardır.

Yapılan bir diğer çalışmada uygulanan elektrik alanının Al-Cu ötektik alaşımının katılaşması üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur [16]. Çalışmada sıvı metal doğrudan elektrotlardan biri olarak kullanılmış, uygulanan statik elektrik alan sıvı-katı arayüzüne yani katılaşma yönüne(+y) dik şekilde(±x) uygulanmıştır. Deneysel sonuçlardan hem pozitif hem negatif elektrik alanın ötektik mesafeyi ve ötektik tane boyutunu artırdığını gözlemlemişlerdir.

Yapılan çalışmalardan görüldüğü üzere alaşımların katılaşması esnasında uygulanan manyetik alan, elektrik alan, manyetik ve elektrik alan pulsu veya bunların birlikte uygulamaları malzemelerin mikroyapılarına, mekanik ve fiziksel özelliklerine etki etmektedir.

Bu çalışmada mikroyapıları çok iyi bilinen Al-%33Cu(ağ.) ve Al-%6,4Ni(ağ) ötektik bileşimdeki alaşımlar literatürden farklı olarak ilk defa katılaşma doğrultusunda (±y), durgun yüksek elektrik alan altında (yüksek voltaj, 7-10kV ve düşük akım, maks 40mA) katılaştırılmıştır. Sıvı alaşımlara pozitif durgun elektrik alan ($E_+$), katılaşma yönünde yani aşağıdan yukarı doğru (+y) ve negatif durgun elektrik alan($E_-$) ise katılaşma yönüne ters yönde (-y) uygulanmıştır. Uygulanan yüksek düzgün elektrik alanın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenerek farklar ortaya konmuştur. Bu özelliklerin elektrik alan büyüklüğü ve yönüne göre nasıl değiştiği ise lineer regresyon analizi ile formülüze edilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

## 1.2 Tezin Amacı

Malzeme bilimindeki gelişmeler teknolojinin gelişmesinde en büyük paya sahiptir. Yazılım endüstrisinden havacılık ve uzay endüstrisine kadar gerçekleşen her gelişme ve buluşta istenilen komutu, dayanımı, işlevi doğru gerçekleştirecek özellikte malzemelere ihtiyaç vardır. Elektronik sektöründen uzay sanayisine kadar birçok alanda metalik malzemelerin önemi çok büyüktür. Bunların arasında da elektrik ve termal iletkenliği, korozyona dayanımı, kolay döküm ve şekillendirilebilirliği gibi bir çok üstün ve geliştirilebilir özellikleri sayesinde alüminyum metali ön plana çıkmaktadır.

Genel olarak metallerin ve özelde Al ve Al esaslı alaşımlarının özelliklerinin iyileştirilmesi için bilim dünyası yoğun bir çaba sarfetmektedir. Bilindiği üzere metallerin kontrollü katılaştırılmasında büyütme hızı, kontrolsüz katılaştırmada ise bileşim yani alaşım elementinin miktarı ve çeşidi ana etkin parametredir. Ancak son dönemde bu bilinen parametrelerin dışında yukarıda sayılan bazı parametrelerin etkileri denenmektedir.

Bunun yanında Al ve Al esaslı alaşımları için laboratuar koşullarında ortaya konmuş; istenilen yapısal, fiziksel ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi için uygulanan yöntem ve tekniklerin endüstriyel üretim alanında da uygulanabilirliğini mümkün kılmak çok önemlidir. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak bu çalışmanın amacı Al-Cu ve Al-Ni gibi farklı ötektik yapıya (sırasıyla lamel ve çubuk) sahip alaşımların yenilikçi bir yöntem olan düzgün doğrusal elektrik alanın literatürden farklı olarak katılaşma doğrultusunda(±y) uygulanarak alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini ortaya koymaktır. Aynı zamanda deney sistemi tasarımı yapılırken olası bir elektropuls, elektrik akımı ve ark oluşumu engellenecek şekilde dizaynı sağlanmış ve en önemlisi böyle dışarıdan uygulanacak bir fiziksel alan çalışmasında kontrolsüz doğrusal katılaştırma ile sanayi üretimine de uygun bir tasarım ortaya koymak amaçlanmıştır.

## 1.3 Hipotez

Araştırmalar sonucu metalik malzemeler dışarıdan uygulanacak herhangi bir elektrik alan geriliminden etkilenmektedir. Özellikle atom ve moleküllerin katı hale göre serbest halde oldukları sıvı durumdan katı hale geçiş sırasında yani katılaşma esnasında uygulanan elektrik alan atom veya moleküllerin üzerine gerilim kuvveti veya elektriksel alan kuvveti oluşturarak; alanın büyüklüğü, doğrultusu ve yönüne bağlı olarak sıvıdan katıya geçiş yapan kütle transferini ve difüzyonu arttırıcı ve azaltıcı yönde etki edecektir. Bu ise katılaşma esnasında atom veya moleküllerin sıvı durumdan katı duruma geçişlerini hızlandıracak veya yavaşlatacak ve mikroyapı düzenini etkilemesi sebebiyle katı-sıvı arayüzeyinin büyüme hızının kontrol edilebilmesini sağlayacaktır. Böylelikle katılaşma morfolojisine dolayısıyla alaşımın mikroyapı, mekanik ve fiziksel özelliklerine etki edilebilecektir.

Katılaştırma için yeni ve henüz tam olarak açıklanamamış bu yeni parametrenin Al-%33Cu(ağ) ve Al-%6,4Ni(ağ) gibi farklı ötektik morfolojiye sahip alaşımlarda, katılaşma yönünde ve katılaşma yönüne ters yönde uygulanacak elektrik alanın malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki ortaya koyacak, yapılacak hesap ve analizlerle elekrtik alana bağlı malzeme özeliliklerinin nasıl değişebileceği gösterilecek ve mekanizma açıklanmaya çalışılacaktır.

# 2
# SIVI KATI DÖNÜŞÜMÜ VE KATILAŞTIRMA

## 2.1 Giriş

Katılaşma sıvı bir fazın sıcaklığı düşürüldüğünde katı faza dönüşmesidir. Katılaştırma, metaller özelinde ise en temel ifadeyle sıvı fazdaki metalin gerekli koşullar altında katı faza geçtiği bir işlemdir. Günümüz teknolojisinin ihtiyaçlarını karşılayacak metal ve alaşımların özellikleri belirlenirken ilk önemli adım bileşimin doğru belirlenmesi, ikinci önemli adım ise mikroyapı parametreleridir. Üretim aşamasında tüm bunlar belirlenirken katılaşma mekanizmasını bilmek çok önemlidir. Katılaşmayı temel olarak katılaşmadan hemen önce olan çekirdeklenme ve ilgili tanımlamaları açıklayarak incelemek mümkündür.

## 2.2 Çekirdeklenme

Çekirdeklenme, sıvı içerisinde belli bir sınır ile çevresinden ayrılmış yeni bir fazın(katı) oluşumu olarak tanımlanabilir [17]. Sıvı ve katının dengede bulunduğu bir sıcaklıkta, sıvı içinde potansiyel bir çekirdek oluşturmak üzere bir atom veya molekül kümesi bir araya gelerek embriyo oluştururlar ve sonuç olarak sıvı-katı arasında bir yüzey meydana gelir. Atomların hareketliliğinden kaynaklı olarak embriyolar kararsızdır ve sürekli oluşup tekrar çözünebilirler. Oluşan embriyo(çekirdekçik) kritik boyuta ulaştığında ve sistemin serbest enerjisi yeterince azaldığında embriyo kararlı hale gelir çekirdek tanımını alır ve devamında kristalleşme başlar [17]–[19].

Çekirdeklenme termal bir süreç içerisinde başlayan ve ilerleyen bir süreçtir. Yani kritik çekirdeğin oluşması ve kritik çekirdek sonrası büyümenin devam edebilmesi için aşılması gereken bir eşik enerji söz konusudur. Bu aktivasyon enerjisi katı-sıvı arayüzey enerjisinden kaynaklanır. Bir sıvı metal katılaşması için soğutulurken ergime derecesine geldiğinde hemen katılaşmaz. Ergime derecesinin bir miktar

altındaki bir noktada katılaşma başlar. Çekirdeklenmeyi homojen ve heterojen çekirdeklenme olarak ele alıp detaylandırmadan önce katılaşma ile ilgili denge, sürücü kuvvet, alt soğuma gibi kavramların açıklanması yerinde olacaktır.

### 2.2.1 Denge Kavramı ve Katı-Sıvı Faz Dönüşümlerinde Denge

Herhangi bir fazın serbest enerjisi basınç, sıcaklık ve kompozisyonun bir fonksiyonu olarak değerlendirilir. Gibbs serbest enerji minimumda olduğunda denge durumundan söz edilebilir. Bu durum,

$$dG(P,T,n_i...) = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,n_i..} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_{T,n_i..} dP + \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,P,n_j..} dn_i + ... = 0 \quad (2.1)$$

Burada $n_i$ i bileşeninin mol sayısıdır. Serbest enerjinin kısmi türevlerine kısmi molar serbest enerji veya kimyasal potansiyel(μ) denir,

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,P,n_j...} \quad (2.2)$$

Denge durumunda T,P sabit olduğunda,

$$dG = \mu_i dn_i + \mu_j dn_j + ... = 0 \quad (2.3)$$

Çok fazlı bir sistem için denge şartı, her bileşenin kimyasal potansiyelinin tüm aşamalarda aynı olması gerekliliğidir. Dengedeki bir sistem için α ve β olmak üzere iki ayrı faz düşünelim. Eğer sistemde bir miktar *dn* α fazından β fazına transfer olduğunda(T,P sabit) her bir faz için serbest enerjisindeki değişim kimyasal potansiyele eşit olacaktır($dG^{\alpha}=\mu^{\alpha}dn$ ve $dG^{\beta}=-\mu^{\beta}dn$). Serbest enerjideki toplam değişim,

$$dG = dG^{\alpha} + dG^{\beta} = (\mu_A^{\alpha} - \mu_A^{\beta})dn \quad (2.4)$$

olur. Denge durumunda dG=0 olacağından

$$\mu^{\alpha} - \mu^{\beta} = 0 \Rightarrow \mu^{\alpha} = \mu^{\beta} \quad (2.5)$$

şeklinde olacaktır. Burada $\alpha$ ve $\beta$ iki fazı temsil eder.

Denge şartları reel sistemlerde gerçekte mevcut olmasa da, yerel termodinamik denge varsayımı altında metalik alaşımların sıvı ve katı bileşimi denge faz diyagramları kullanılarak belirlenebilir. Denge faz diyagramları sıvı katı dönüşüm oranını aşırı yavaş veya difüzyon hızının çok hızlı olduğu varsayılarak bir sistemin yapısını kompozisyon ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlar[20].

Faz dönüşümleri bir malzemenin mevcut fazının dönüşeceği yeni faza göre sıcakık, entalpi, entropi, basınç gibi termodinamik koşullar altında kararsız hale geldiğinde gerçekleşir. Sabit basınç ve sıcaklık altında bir sistem için, termodinamik ölçütlerin dengeden değişimi Gibbs-Duhem eşitliği ile verilir:

$$\Delta U + P\Delta V \geq T\Delta S \tag{2.6}$$

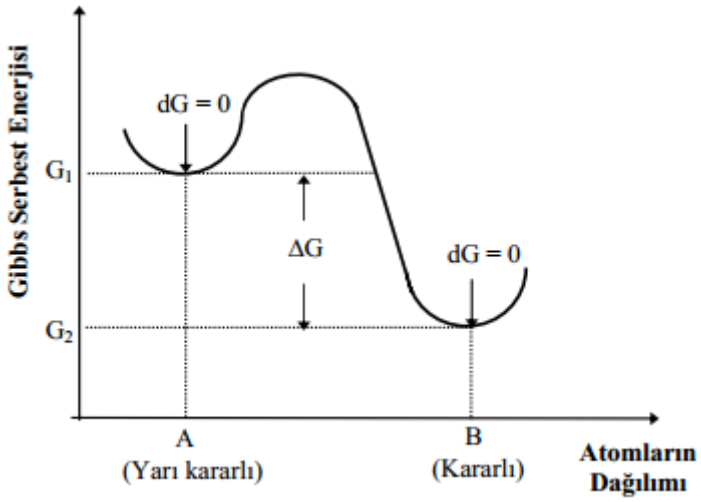
Burada $\Delta$U, $\Delta$V ve $\Delta$S sırasıyla iç enerji U, hacim V ve entropi S'nin denge halinden değişimleridir. En geniş anlamıyla denge, entropi maksimum ve entalpi minimuma karşılık gelen durum olarak tanımlanmıştır [21].

Bir faz geçişi mikroskobik ölçekte görünmeye başlar. Örneğin, bir sıvının veya erimiş bir metalin katılaşması, katı fazın oluşan embriyodan katılaşma sıcaklığının altında başlar.

Sıvı-Katı dönüşümlerde denge durumunu ele aldığımızda klasik termodinamiğe göre yalıtılmış bir sistem için(T ve P sabit) Gibbs serbest enerjinin minimum olduğu durumda sistem dengededir. Yani böyle bir sistem için denge durumunda Gibbs serbest enerjideki değişim,

$$(\mathrm{dG})_{T,\mathrm{P}} = 0 \tag{2.7}$$

olarak yazılır. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere (2.7) denklemi A(yarı kararlı), B(kararlı) durumu göstermektedir.

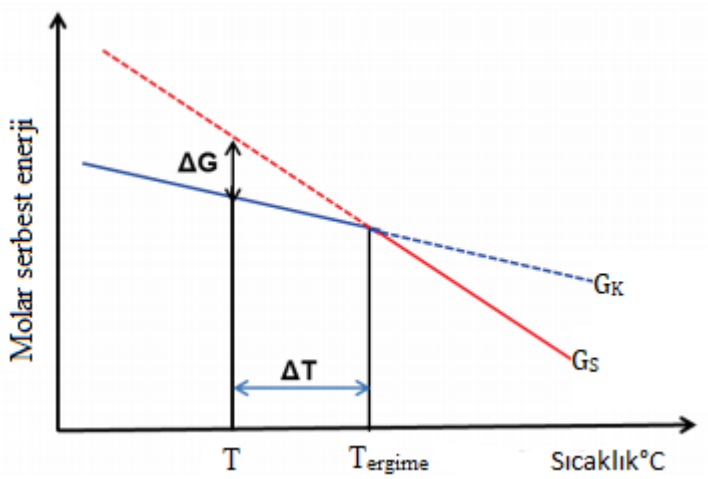



**Şekil 2.1** Atom dağılımlarına göre sistemin Gibbs serbest enerjisinin değişimi [22]

### 2.2.2 Sürücü Kuvvet ve Alt Soğuma

Bir sıvı ergime derecesinin altında bir değere soğutulduğunda Gibbs serbest enerjide $\Delta G=G_1-G_2$ ölçütünde bir değişim meydana gelir. Enerjideki bu değişim katılaşma mekanizmalarının ilerlemesini sağlayan sürücü kuvveti temin eder [22].

Denge faz diyagramları belirli bir sistemin denge özellikleri hakkında bigi verir ve böylece kristalizasyon sürecini anlamak için faydalıdır. Bu diyagramlar bize bir sıvının denge sıcaklığının altına soğutulduğunda katılaşma için bir itici güç üretildiğini söyler. Sıvı fazın donma noktasında ekstra bir güce gerek kalmadan katılaşması beklenebilir. Buna nazaran uygun koşullar altında, bir sıvı denge erime sıcaklığının altında aşırı soğutulabilir ve herhangi bir dönüşüm meydana gelmeden orada tutulabilir[23]. Erime noktası ile katılaşma sıcaklığı arasındaki bu şekil 2.2'de görülen sistemin alt soğuması olan $\Delta T$ miktarıdır. Söz konusu alt soğuma miktarı katılaşma için itici gücü sağlamış olur($\Delta G$).




**Şekil 2.2** İki faz için Gibbs serbest enerjinin sıcaklıkla değişimi; $G_s$: sıvı faz, $G_k$: katı faz [22]

Erime sıcaklığında hem katı hem de sıvı denge içinde bir arada bulunur ve Gibbs serbest enerjisi hem katı hem de sıvı fazlar için eşittir.

$$\Delta G_V = G_V^s - G_V^k = 0 \tag{2.8}$$

Burada hacimsel Gibbs serbest enerji, $\Delta G_v$ sistemdeki çok küçük bir değişimi temsil eder ve ihmal edilebilir [24]. Bu şekilde Gibbs serbest enerjideki değişim şu şekilde verilir,

$$\Delta G = \Delta U - T\Delta S \tag{2.9}$$

Bu denklem herhangi bir durumun oluşmasının minimum iç enerji ve maksimum entropi arasında bağ olduğunu gösterir. Dönüşüm sıcaklığında, sistem bir miktar ısıyı emer veya serbest bırakır(ergime ısısı, $\Delta H_f$).

$$\Delta H_f = T_f \Delta S_f \tag{2.10}$$

Küçük aşırı soğutmalar için entropi ve entalpinin sıcaklıktan dolayısıyla sabitten bağımsız olduğu varsayılabilir. Bu durumda Gibbs serbest enerjideki değişim:

$$\Delta G = \frac{\Delta H_f \Delta T}{T_f} \tag{2.11}$$

olur. Bu eşitliklerden görüleceği üzere katılaşmada sürücü kuvvet, alt soğuma ile ilgilidir.

### 2.2.3 Homojen Çekirdeklenme

Çekirdeklenme, genellikle çekirdek olarak adlandırılan yeni fazların lokalize olmuş bir görünümüdür. Homojen çekideklenme, katı fazın çekirdekleri sıvı içinde serbestçe oluştuğunda meydena gelir [25]. Daha açık bir ifadeyle Homojen çekirdeklenme saf bir fazın özdeş parçacıklarının difüzyonunu içerir ve yüksek alt soğuma altında gerçekleşir. Bu denli düşük sıcaklıklarda, beklendiği üzere katı faz sıvı fazdan daha kararlıdır. Homojen çekirdeklenme teorisine göre katı çekirdekler aşırı soğutulmuş fazda kendiliğinden ortaya çıkar ve yeni faz veya fazlar ana fazdan büyürler [24], [26], [27].

Alaşımlarda itici güç hem sıcaklığın hem de bileşimin bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkar. Bu durum $T_e$'nin altındaki tüm sıcaklıklarda bir itici gücün varlığını ortaya koyar ve $T_e$'nin altındaki herhangi bir sıcaklığa soğutulması üzerine çekirdeklenmenin meydana geleceğini düşündürür [25].

Sabit sıcaklık ve basınçta meydana gelen dönüşümler için, sistemin göreceli kararlılığı sistemin Gibbs serbest enerjisi ile belirlenir.

$$G = H - TS \tag{2.12}$$

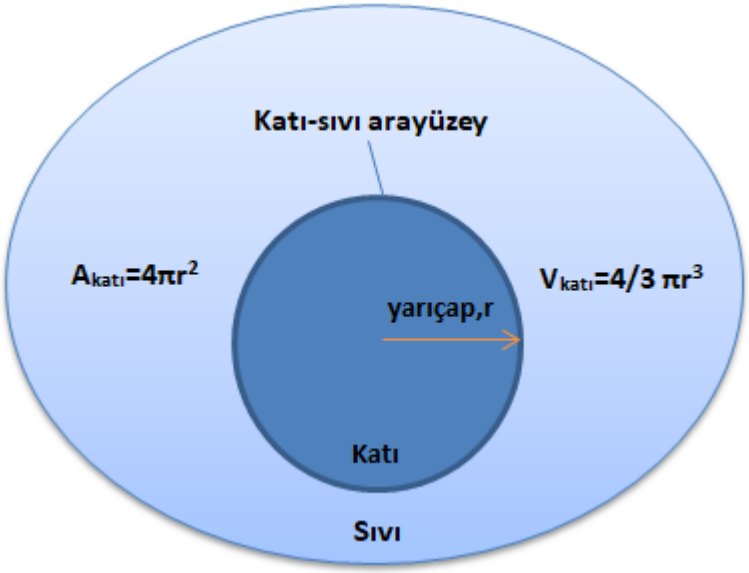
Burada H entalpi T mutlak sıcaklık ve S sistemin entropisidir. Önceki konularda değinildiği gibi yeni fazın(katı) ve ana fazın(sıvı) serbest enerjisi arasındaki fark, katılaşma için itici güçtür(sürücü kuvvet). Çekirdeklenme işlemi sırasında, atomlar veya moleküller sıvıdan katı embriyoya difüze olurlar ve hacim serbest enerjisinde bir değişikliğe yol açarlar ($\Delta G_V$). Ayrıca katı ile sıvı arasında bir arayüz oluşumu sebebiyle sistemin yüzey serbest enerjisinde($\Delta G_s$) ortaya çıkan bir değişiklik söz konusudur. Böylece çekirdeklenmeyle ilgili serbest entalpideki değişim şu şekilde verilmiştir [21],

$$\Delta G = \Delta G_V + \Delta G_s \tag{2.12}$$

Eğer $\Delta g_v$ hacim başına yeni fazın serbest entalpisi ise ve burada V yeni fazın hacmi ve $\gamma_{ks}$ katı/sıvı arayüzey serbest enerjiyse, sonuç olarak Gibbs serbest enerjisinde meydana gelen değişiklik,

$$\Delta G = -V\Delta g_V + A_{ks}\gamma_{ks} \tag{2.13}$$

Yeni olaşan fazla ilgili olarak fazla serbest enerji oluşan fazın şeklinin doğru seçilmesiyle en aza indirilebilir. Arayüzey serbest enerjisi izotropik ise, en düşük yüzey alanı/hacim oranına sahip şekil küresel şekildir. Böylece yeni faz yarıçapı r olan küresel bir embriyo olduğu düşünülebilir (Şekil 2.3).



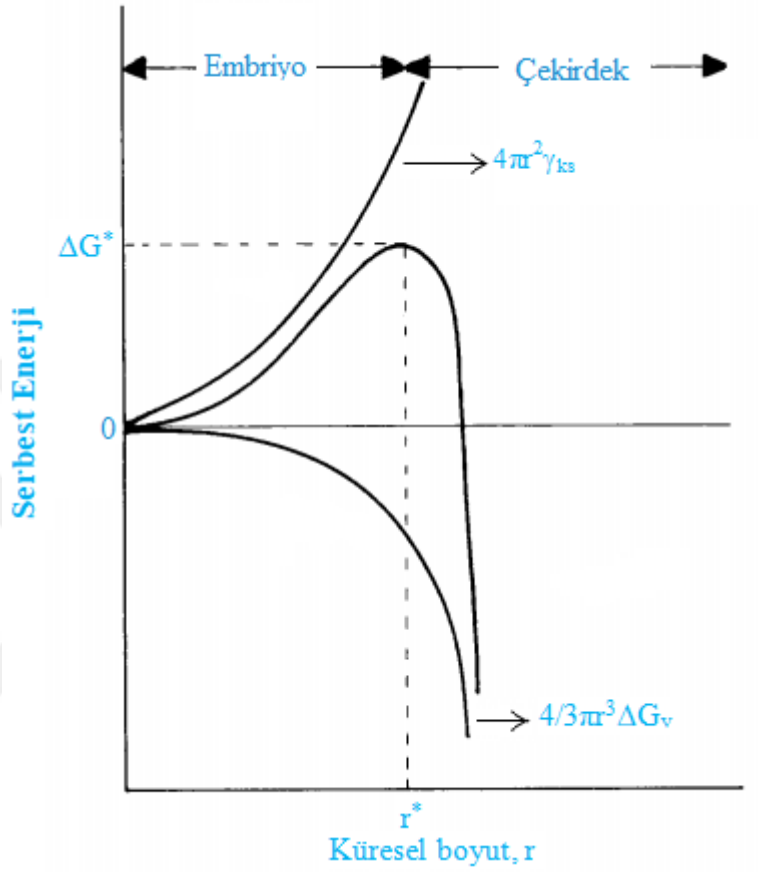

**Şekil 2.3** Homojen çekirdeklenme için varsayılan küresel katı embriyo oluşumu şematik gösterimi

Bu durumda eşitlik 2.13 şu şekilde yazılabilir,

$$\Delta G = -\frac{4\pi r^3}{3}\Delta g_V + 4\pi r^2\gamma_{ks} \tag{2.14}$$

Burda $\Delta g_v$ birim hacim başına yeni faz oluşumunun serbest enerjisindeki değişiklik, $\gamma_{ks}$ ise birim alan başına arayüzey serbest enerjisidir ve r küresel kabul edilen yeni katı yüzeyin yarıçapıdır.

Homojen çekirdeklenme koşuluna bakıldığında, yarı kararlı embriyonun sabit kararlı bir çekirdeğe doğru büyümeye devam etmesi gerekliliğidir. Bu durum şekil 2.4 de gösterildiği üzere embriyo yarıçapı $r^*$ değerini aştığında meydana gelir. Bu kritik yarıçap değeri $r^*$, $d\Delta G/dr=0$ koşuluna karşılık gelir.




**Şekil 2.4** Katı-sıvı sisteminin toplam serbest enerjisi katı maddenin boyutuna göre değişimi. Yatıçap kritik yarıçaptan küçükse embriyo, yarıçap kritik yarıçaptan büyükse katı bir çekirdektir [25], [28]

Yüzeyler oluşurken, yüzey enerjisindeki değişim her zaman pozitiftir. Çekirdeklerin ilk oluşumu serbest enerjideki değişimi arttırır. Sistem en yüksek fazla serbest enerjiye sahip olduğunda belirli bir yarıçap boyutu değeri vardır($r^*$). Bu oluşan kümenin kritik yarıçap boyutudur. Böyle bir kümeleşme (embriyo) büyüme ve bozulmanın eşit olasılıklarına sahiptir ve yeni fazın çekirdeklerini temsil eder. Eğer bu küme veya embriyo $r^*$ kritik yarıçaptan daha büyük bir boyuta ulaşırsa büyümesine serbest enerjinin azalması eşlik eder ve kendiliğinden olşur. $r^*$ yarıçapından daha küçük kümelerin büyümesi serbest enerjideki artışa bağlıdır ve enerjisel olarak elverişsizdir. Bu durumlarda küme sistemdeki serbest enerjiyi

düşürmek için çözünür ve sıvı faza geri döner. Yani bir kümenin büyümesi veya çözünmesi durumu sistemin Gibbs serbest enerjisindeki değişime göre belirlenir [21], [23], [24], [27], [29], [30]. Kümenin kritik yarı çapı $r^*$ ve kümenin kritik serbest enerjideki, $\Delta g_V^*$ değişimi sırasıyla:

$$r^* = \frac{2\gamma_{ks}}{\Delta G_V} \tag{2.15}$$

ve

$$\Delta G^*_{\text{hom}} = \frac{16\pi\gamma_{ks}^3}{3(\Delta G_V)^2} \tag{2.16}$$

$\Delta G_V^*$ moleküllerden bir kristal oluşturmak için aşılması gereken bariyerdir. $\Delta T$ kadar alt soğuma $\Delta G_V$ değişikliğe sebep olur:

$$\Delta G_V = \frac{L_V \Delta T}{T_m} \tag{2.17}$$

Bu nedenle kritik yarı çap ve ilgili serbest enerji bariyeri:

$$r^* = \left(\frac{2\gamma_{ks} T_m}{L_V}\right)\frac{1}{\Delta T} \tag{2.18}$$

ve

$$\Delta G^*_{\text{hom}} = \left(\frac{16\pi\gamma_{ks}^3 T_m^2}{3(\mathrm{L}_V)}\right)\frac{1}{(\Delta \mathrm{T})^2} \tag{2.19}$$

şeklinde olur.

Görüldüğü üzere homojen çekirdeklenme teorisinde iki terim de sıcaklığa bağlıdır ancak yüksek alt soğuma durumlarında yeni bir faz oluşturmanın daha kolay olduğu görülür.

Homojen çekirdeklenmede çekirdeklenme hızı($I_{\text{hom}}$) ise; birim hacim başına bahsi geçen kritik yarıçapa ulaşan embriyoların sayısına($n_{r^*}$) ve atomların sıvıdan embriyolara katılma sıklığına bağlıdır. Şekil 2.4'te bir embriyo oluşumunun enerjide bir artışa eşlik ettiği gösterilse de, sıvıdaki her büyüklükteki embriyoların denge konsantrasyonu vardır, çünkü bunların varlığı sistemin entropisni arttırır. Bu durum, kritik boyuttaki embriyolar için yeterli büyüklükte olduğunda

$$n_{r^*} = n\exp(\frac{-\Delta G^*}{kT}) \tag{2.20}$$

Olarak ifade edilir. Burada n birim hacim başına toplam atom sayısıdır. Atomların aktarılma sıklığı viskozite ile ters orantılıdır ve

$$n = (\frac{kT}{h})\exp-(\frac{\Delta G_D}{kT}) \tag{2.21}$$

Olarak ifade edilebilir. Burada $\Delta G_D$ difüzyon için aktivasyon enerjisidir, k Boltzmann sabiti ve h Planck sabitidir. Bu durumda homojen çekirdeklenme hızı:

$$I_{\text{hom}} = \frac{nkT}{h}\exp-\left(\frac{\Delta G^* + \Delta G_D}{kT}\right) \tag{2.22}$$

daha açık bi afadeyle yazmak gerekirse:

$$I_{\text{hom}} = \frac{nkT}{h}\exp\left(-\frac{\Delta G_D}{kT}\right)\exp\left(-\frac{16\pi\gamma_{ks}}{3(\Delta G_V)^2 kT}\right) \tag{2.23}$$

olur.

Çekideklenme teorisi üzerine Turnbull'un[31]–[34] yaptığı çalışmalar bu konu için büyük ışık tutumuştur. Turnbull[35], Becker'in[36] yaklaşımından yararlanarak

homojen çekirdeklenme kinetiğini aydınlatmak ve arayüzey enerjisini tahmin etmek için kullanılan teorisini sunmuşlardır. Bu durumda katı-sıvı arayüzey enerjisi $I_{hom}$'göre eşitlik 2.22'de:

$$\gamma = \left\{ \frac{3x2.303\Delta G_V{}^2 kT}{16\pi} \times \log\left[ \frac{nkT\exp(-\Delta G_D / \mathrm{kT})}{I_{\mathrm{hom}} h} \right] \right\}^{1/3} \qquad (2.24)$$

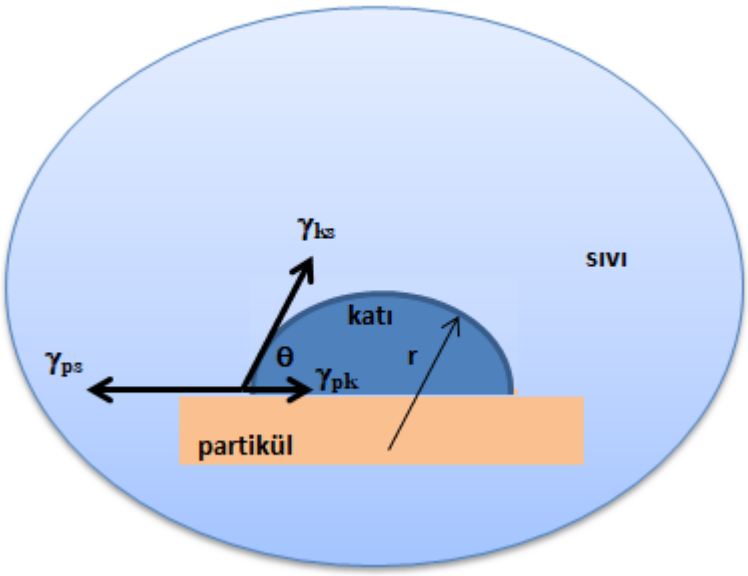
şeklinde yazılabilir.

Bu çalışmalara göre çekirdeklenme öncesi gözlenen maksimum alt soğuma, homojen çekirdeklenme için gerekli olan enerjiyi temsil ettiği varsayılmıştır. Homojen çekirdeklenme normal döküm işlemlerinde meydana gelmez. Safsızlıkların etkisini ortadan kaldırmak veya bu etkileri küçük bir hacimle sınırlamak için özel önlemler alındığında gözlenebilir [25].

### 2.2.4 Heterojen Çekirdeklenme

Katılaştırmada yeni bir fazın kalıp duvarları, partiküller, dislokasyonlar gibi bir altlık(substrat) üzerinde çekirdeklenmesine heterojen çekirdeklenme denir. Bu altlıklar yüksek enerjili bölgelerdir ve yeni bir fazın bu bölgelerde çekirdeklenmesi daha az enerji gerektirir. Yeni fazın buralarda oluşumu tercih edilir çünkü gerekli olan toplam serbest enerji ihtiyacının bir kısmı bu yüzeyler sayesinde dengelenir. Bir altlık üzerinde çekirdeklenme sağlanarak yeni fazın arayüzey serbest enerjisi önemli ölçüde azaltılır ve fazın gerekli olan toplam serbest enerjisi azaltılmış olur. Heterojen bir çekirdekleyicinin (altlık, partikül) etkili olabilmesi için partikül-katı çekirdek arayüzünün arayüz serbest enerjisi, partikül-sıvı ve sıvı-katı arayüzeylerinin arayüz serbest enerjilerinin toplamından daha küçük olması gerekir.

$$A_{ps}\gamma_{pk} \geq A_{pk}\gamma_{pk} + A_{ks}\gamma_{ks} \qquad (2.25)$$




**Şekil 2.5** Heterojen çekirdeklenme şematik gösterimi

Katı ve sıvı arasındaki yüzey serbest enerjisi $\gamma_{ks}$ izotropik ise ve embriyo küresel bir kapak şeklinde olduğu düşünülürse sistemin belli hacmi için toplam arayüz enerjisi en aza indirilir (şekil 2.5). Bu küresel kapak şekil 2.5'de görüldüğü gibi bir θ ıslatma açısına sahiptir. Bu durumda,

$$\gamma_{ps} = \gamma_{pk} + \gamma_{ks} \cos\theta \tag{2.26}$$

ve

$$Cos\theta = \frac{\gamma_{ps} - \gamma_{pk}}{\gamma_{ks}} \tag{2.27}$$

şeklinde ifade edilir. Böyle bir embriyo oluşumuna bağlı olarak aşırı serbest enerji aşağıdaki gibidir:

$$\Delta G_{het} = -V_k \Delta G_V + A_{pk}\gamma_{pk} + A_{ks}\gamma_{ks} - A_{pk}\gamma_{ps} \tag{2.28}$$

Burada $V_k$ küresel kapak şeklin hacmi, $A_{ks}$ ve $A_{pk}$ katı-sıvı ve partikül-katı arayüzey alanı, $\gamma_{pk}$, $\gamma_{ps}$ ve $\gamma_{ks}$ partikül-katı, partikül-sıvı ve katı-sıvı aryüzey serbest enerjileridir. Eşitlik (2.28)'e bakıldığında üç arayüzey enerji katkısı vardır. İlk ikisi

çekirdeklenme işlemi sırasında oluşturululan arayüzeylerden kaynaklı ve pozitiftir. Üçüncüsünün ise serbest enerjiye etkisi negatiftir ve küresel başlık altındaki sıvı-partikül arayüzünün tahrip olmasından kaynaklanır [17], [24], [25], [29]. Islatma açısı ve şeklin yarıçapından kaynaklı eşitlik (2.28),

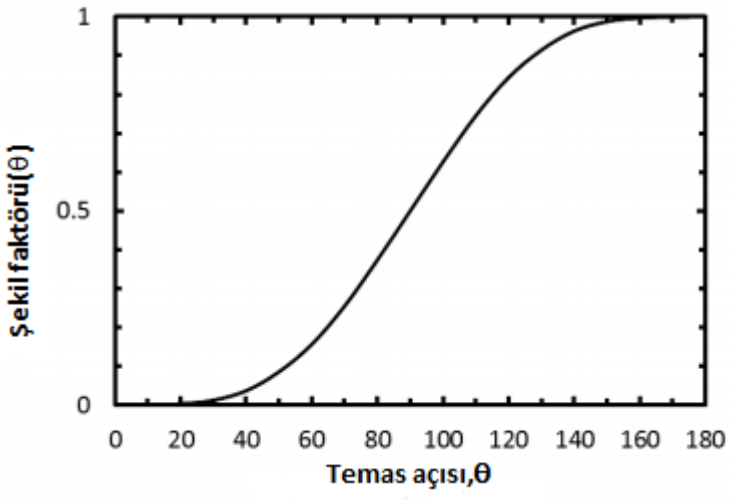
$$\Delta G_{het} = \left( -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{ks} \right) \left( \frac{(2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2}{4} \right) \tag{2.29}$$

$$\Delta G_{het} = (\Delta G_{\text{hom}})\mathrm{S}(\theta) \tag{2.30}$$

şeklinde yazılabilir ve burada

$$S(\theta) = \frac{1}{4}(2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2 \tag{2.31}$$

S(θ) geometrik şekil faktörüdür ve sayısal olarak S(θ) < 1 dir ve θ temas açısıdır. Eşitlik 2.30'den anlaşabileceği üzere heterojen çekirdeklenemenin enerji engeli homojen çekirdeklenmeninkinden S(θ) katı kadar daha küçüktür. Söz konusu açı değerinin düşük oluşu, homojen çekirdeklenmeye kıyasla heterojen çekirdeklenme mekanizmasında enerji engelini azaltır [25]. Aşağıda şekil 2.6'da θ açısına göre şekil faktörünün nasıl değiştiği gösterilmiştir.

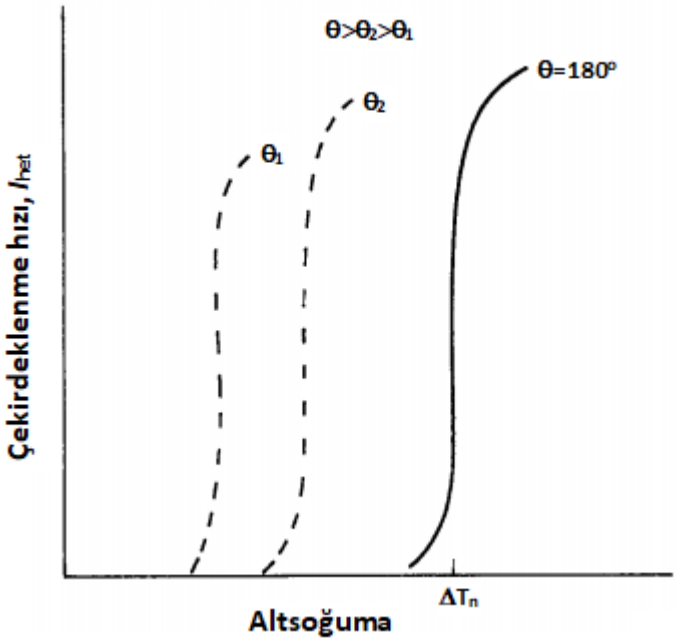



**Şekil 2.6** Şekil faktörünün temas açısına göre değişimi

Tumbull ve Fisher[35] heterojen çekirdeklenme hızını aşağıdaki eşitlikle açıklamışlardır.

$$I_{het} = \frac{nkT}{h} \exp - \left[ \frac{(2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2}{4kT} \Delta G^* + \frac{\Delta G_D}{kT} \right] \qquad (2.32)$$

θ açısının $I_{het}$ üzerine olan etkisi şekil 2.7'de verilmiştir.




**Şekil 2.7** Temas açısının etkisini gösteren çekirdeklenme hızının alt soğma ile değişimi [25]

### 2.2.5 Ötektik Çekirdeklenme

Ötektik alaşımlarda kararlı durum büyümesi öncesinde iki çekirdeklenme olayı meydana gelmelidir. Birincisi, alaşım bileşimine bağlı olarak likidüs veya ötektik sıcaklığın altında bir miktar alt soğumada meydana gelen bir birincil fazın çekirdeklenmesidir. Bu faz çekirdeklenme gücüne bağlı olarak diğer ötektik fazın çekirdeklenmesini teşvik etmek ya da engellemek üzere hareket edebillir.

Bir katının başka bir katıyı heterojen olarak çekirdekleştirebilmesi özellikle ötektik sistemlerde bir dizi araştırmaya konu olmuştur. Çoğu çalışma ötektik alaşımların karşılıklı olmayan çekirdeklenme karakteristikleri sergilediğini, yani birincil fazın diğer faz için etkili bir heterojen çekirdekleşme bölgesi olarak hareket edeceğini

göstermiştir [37]–[40]. Bazı ötektik alaşımlar için, birincil faz epey zayıf bir çekirdekleyici olabilir ki çevreleyen eriyik aşırı alt soğumaya maruz kalır. Bu da ötektik büyüme olmadan önce aşırı alt soğumaya maruz kalmış fazda dendritik büyüme ile sonuçlanır [37]. Ötektik çekirdeklenmede her bir birincil fazın çekirdekleme kabiliyetlerindeki farklılıkların temeli net olmamakla birlikte birincil fazın erime noktası ve arayüzey enerji argümanlarıyla ilişkilendirilmiştir [41]. Şekil 2.5 dikkate alındığında altlıkla sıvı arasındaki katı-sıvı arayüzey enerjisi katılaşma için itici gücün bir parçası olduğu düşünülürken, çekirdeklendirilmiş katının katı-sıvı arayüzey enerjisi katılaştırma için aşılması gereken bir çekirdeklenme bariyeri olduğu düşünülmüştür. Başka bir deyişle $\gamma_{ps}$'deki bir artış embriyonun ıslanma açısını $\theta$ azaltma eğilimi gösterirken, $\gamma_{ks}$'deki artış bu açıyı artırma eğilimindedir. Yani demek olur ki yüksek katı-sıvı arayüzey enerjilerine sahip metallerin çekirdeklenmesi güçtür ve iyi çekirdekleştirici maddeler olma eğiliminde olurlar. Katı-sıvı arayüzey enerjileri düşük olan metallerin çekirdekleşmesi kolay olur fakat zayıf çekirdekleştirici özellik gösterirler. Ayrıca yüksek erime sıcaklıklarına sahip elementler, tipik olarak aynı kristal yapısına sahip daha düşük erime sıcaklığına sahip elementlerden daha yüksek $\gamma_{ks}$'ye sahip olduklarından daha iyi çekirdekleyici özellik gösterirler. Kristal yapı heterojen çekirdeklenmede önemli bir faktördür. Genellikle aynı kristal yapısına sahip iki metal arasındaki arayüz enerjisi farklı kristal yapılardaki metaller arasındaki arayüz enerjisinden daha düşük olacaktır.

## 2.3 Katılaştırma

Metalik malzemelerin üretiminde ürünü oluşturan alaşım elementleri-mikroyapı birlikteliği, metalurji bilimi açısından stratejik bir bağ oluşturmaktadır [42]–[44]. Bu yüzden istenilen özelliklerde ve yüksek performansa sahip malzeme üretiminde mikroyapı kontrolü günümüzde çok önemli bir hal almıştır. Çünkü bileşim ve mikroyapı parametereleri malzeme özellikleri ile ilgili ilk öngörüyü verir ve nasıl geliştirilebileceği, kullanılabileceği hakkında yol gösterir.

Malzemenin mikroyapısının belirlenmesinde alaşımın bileşimi($C_0$) ve katılaştırma süresi en önemli durumlardır[45]. Katılaştırma süreci bileşim ($C_0$), katılaştırma hızının (V) ve sıcaklık gradyentinin (G), ayrı ayrı kontrol edilebildiği bir süreçtir. Bu parametrelerin kontrolü sayesinde alaşımın mikroyapı özellikleri (ötektik

mesafeler, tane boyutu, faz büyüklükleri) buna bağlı olarak da mekanik özellikleri (sertlik, çekme dayanımı) ve fiziksel özellikleri (elektriksel ve termal iletkenlik) belirlenebilir. Malzeme özelliklerini belirlemede çok önemli olan bu parametrelerin kontrolü için oldukça fazla çalışma yapılmıştır [44], [46]–[55]. Görüleceği üzere parametre kontrolü ve malzeme üretimi doğrusal katılaştırma yöntemiyle daha iyi sağlanmaktadır. Üretimdeki çekmeler nedeniyle oluşan çöküntüler, çatlamalar, çarpılmalar, uniform olmayan dağılımlar gibi kusurlar doğrusal katılaştırma yöntemiyle elimine edilebilmektedir. Bu yüzden doğrusal katılaştırmanın endüstrideki yeri çok önemlidir [56].

Doğrusal katılaştırma sistemi tanıtılmadan önce katılaşma sırasında sistemde görülebilecek alt soğumalardan kısaca bahsetmek yerinde olacaktır:

Sıvı fazdan katı faza geçiş için bir metalin sıcklığı, denge durumundaki erime sıcaklığı olan $T_m$'nin altındaki bir T sıcaklığına kadar indirilmesi gerekir. Bu durum alt soğuma olarak bilinir. Böyle bir sistem için toplam alt soğuma, $\Delta T$,

$$\Delta T = T_m - T \tag{2.33}$$

eşitliği ile ifade edilir. Alaşım sistemlerinde $\Delta T$ değeri; sıvının bileşimine, arayüzey eğriliğine ve sıvıdan katıya geçecek olan atomların karşılaştığı enerji engeline bağlıdır. Bu durumda $\Delta T$ değeri, bu sayılan alt soğumaların toplamı olup

$$\Delta T = \Delta T_s + \Delta T_r + \Delta T_k \tag{2.34}$$

şeklinde ifade edilir. Burada $\Delta T_s$ sıvıda çözünen yayınımından kaynaklı alt soğuma(çözünürlük alt soğuması), $\Delta T_r$ sıvı-katı arayüzey eğriliğinden kaynaklanan alt soğuma(eğrilik alt soğuması) ve $\Delta T_k$ sıvı-katı dönüşümündeki enerji engelinden kaynaklanan kinetik alt soğumadır.

- **Çözünürlük alt soğuması $\Delta T_s$**

Sistemin alaşım elementlerinin katı ve sıvı fazdaki çözünürlüğü arasındaki fark çözünürlük veya bileşimsel alt soğuma olarak adlandırılan ek bir alt soğumaya sebep olur. Bir sistemde sıvı-katı arayüzeyinin denge durumu söz konusu

olduğunda, sıvı fazda bileşim gradyenti olmadığından $\Delta T_s=0$ olur. Böyle bir durumda alt soğumanın toplamı($\Delta T$) eğrilik alt soğumasına eşit olur[57].

- **Eğrilik alt soğuması ($\Delta T_r$)**

Sıvı-katı arayüzey eğriliğinden dolayı oluşan alt soğuma türüdür. Böyle bir arayüzey düşünüldüğünde sistem için kimyasal ve mekaniksel bir dengeden söz edilebilir. Bu denge göz önünde bulundurularak:

$$\Delta T_r = \Gamma\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right) \tag{2.35}$$

Eşitliği verilmiştir. Eşitlikte $\Gamma$ Gibbs-Thomson sayısıdır. $r_1$ ve $r_2$ arayüzeydeki eğriliğin yarıçaplarını ifade eder. Küresel arayüzeyi düşünüldüğünde bu r değerleri $r_1=r_2=r$ olup eşitlik (2.35)

$$\Delta T_r = \frac{2\Gamma}{r} \tag{2.36}$$

Şekllinde yazılır. Sıvı-katı arayüzeyi silindirik olarak ele alındığında ise $r_1=r$ ve $r_2=\infty$ olacağından eşitlik(2.35)

$$\Delta T_r = \frac{\Gamma}{r} \tag{2.37}$$

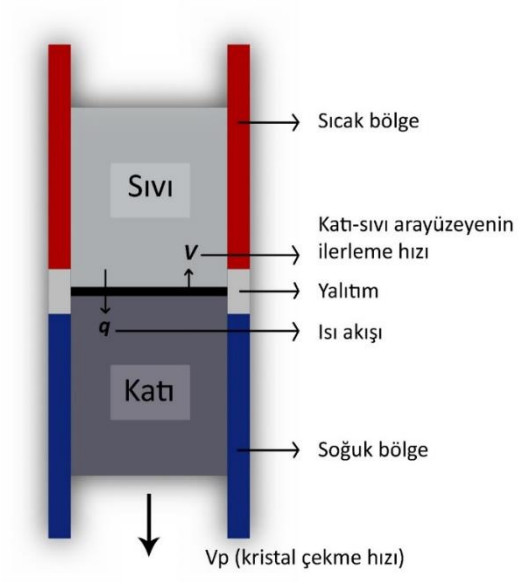
Olur [57].

- **Kinetik alt soğuma ($\Delta T_k$)**

Alt soğuma kavramı katı-sıvı arayüzündeki atom kinetiği üzerinden de değerlendirilebilir. Herhangi bir malzeme için katı-sıvı arayüzü hareket ettiğinde arayüzdeki atomların net transferleri bu iki atomik süreç arasındaki farktan kaynaklanır. Katılaşma hadisesinin gerçekleşebilmesi için sıvıdan katıya atlayan atom sayısı katıdan sıvıya atlayan atom sayısından fazla olması gerekir. Sonuç olarak katılaştırma arayüzünde kinetik alt soğuma olarak adlandırılan ve egime derecesinin bir miktar altındaki sıcaklıklarda katılaşma gerçekleşir.

### 2.3.1 Doğrusal Katılaştırma Sistemi

Doğrusal katılaştırma sisteminde, kullanılan fırın tipine bağlı olarak numune, sabit sıcaklıkta sıcak(alaşımı ergitecek noktada) ve soğuk bölgede sıvı-katı dengesi oluşacak şekilde düzeneğe yerleştirilir. Bu noktadan sonra ya numune sabit bir hızla çekilerek ya da ısıtıcı sistemin hareketiyle katılaştırma başlatılır ve sürdürülür (şekil 2.8).




**Şekil 2.8** Doğrusal katılaştırma dizaynı şematik gösterim [58]

## 2.4 Ötektik Alaşımların Katılaştırılması

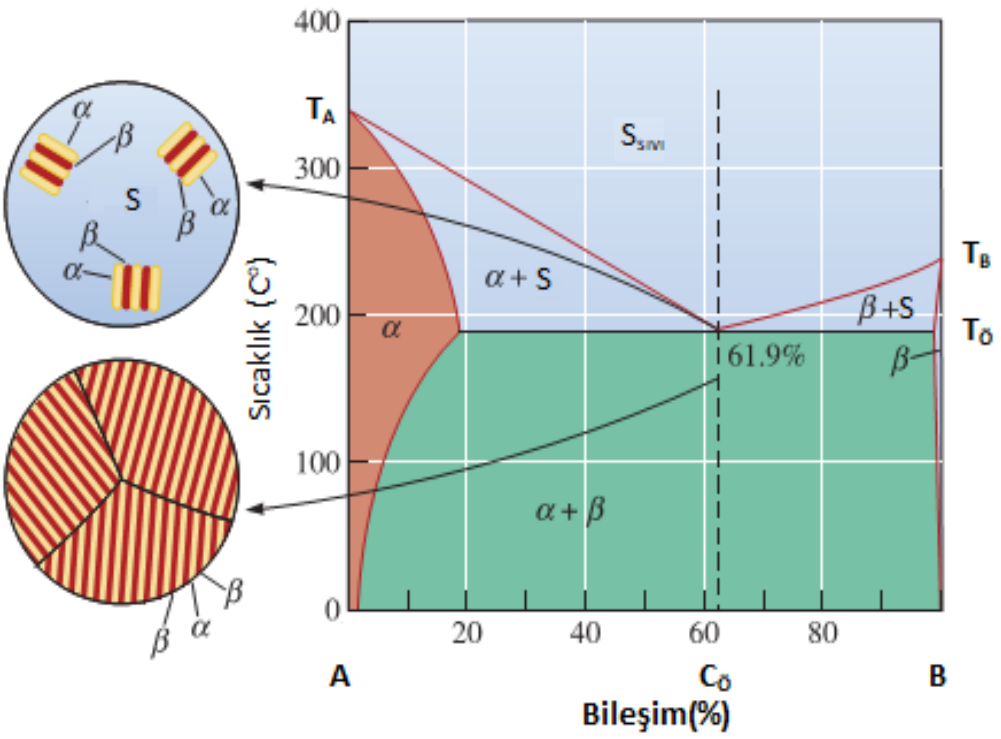
Metallerde düzenli bir mikroyapı oluşturulması ve faz boyutlarının (λ) belirlenmesi bu metallerin katılaştırma sırasındaki katılaştırma parametelerine (G sıcaklık gardyenti, V katılaştırma hızı, $C_0$ bileşim) bağlıdır. Bu parametreler ayrı ayrı kontrol edilerek alaşımın mikroyapısı (faz ve tane boyutları vs) ve dolayısıyla mekanik ve fiziksel özellikleri değiştirilebilir.

Ötektik bölgenin tanımı ise sistemde α , β katı fazlarının ve bu fazların katılaştığı sıvının dengede bir arada bulunduğu bölge olarak tanımlanır. Bu şartları sağlayan noktanın sıcaklığı ötektik sıcaklık olarak isimlendirilir. Bu noktadaki bileşim ise ötektik bileşim olarak adlandırılır. Ötektik bileşim gerçekleştiren sistemler için,

bileşen atomları birbirlerinin ergime derecelerini ve saf haldekinden daha düşük değerlerde ergime ve katılaşma oluştururlar ve ötektik reaksiyon gereği ötektik noktadaki ergiyik iki ayrı katı faz dönüşümü gerçekleştirerek katılaşmayı tamamlar [3].

$$Sıvı \underset{ısınma}{\overset{soğuma}{\rightleftarrows}} Katı(\alpha) + Katı(\beta) \qquad (2.38)$$

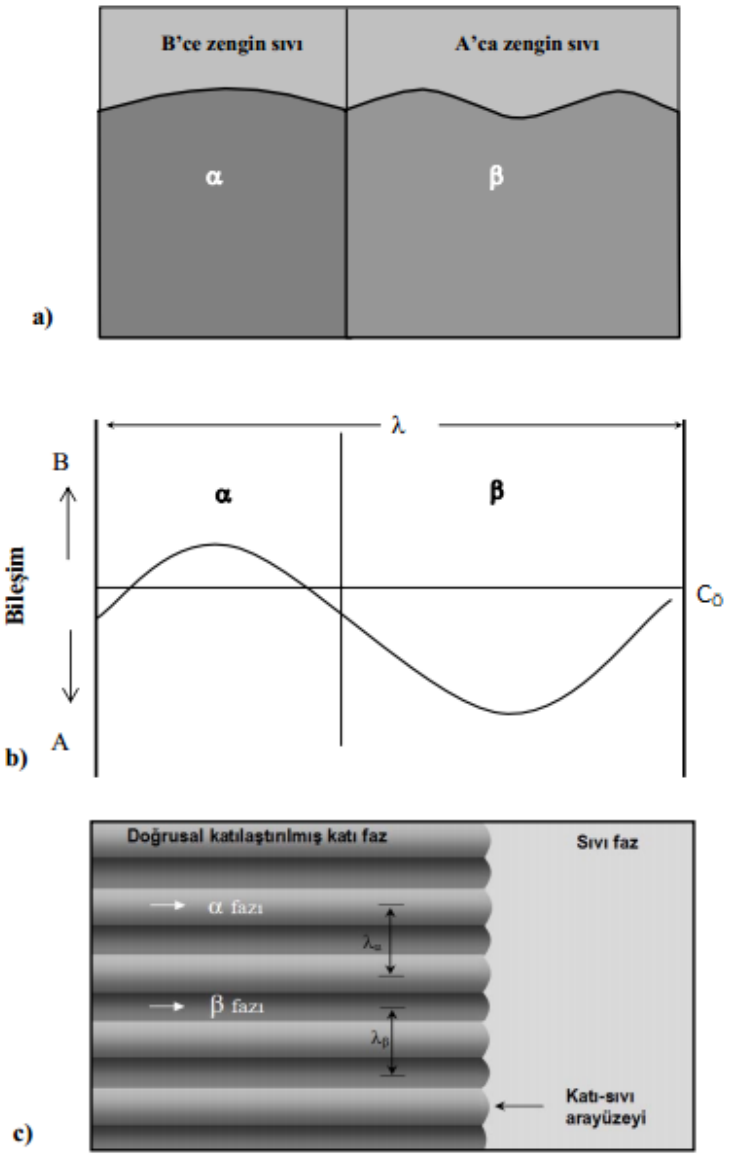
Bu katılaşma sırasında iki katı faz da birlikte büyüyerek karakteristik ötektik yapıyı oluşturur. Söz konusu bu yapı katılaştırma esnasında gradyente (G), bileşime ($C_0$) ve katılaşma hızına (V) göre değişiklik gösterir. Şekil 2.9'de[28] ikili ötektik sistem için örnek diyagram ve şematik ötektik mikroyapısı verilmiştir.




**Şekil 2.9** Ötektik bileşimdeki bir alaşımın katılaştırılması ve ötektik mikroyapısı şematik gösterimi [28]

Bu sistemi A ve B gibi ötektik alaşım oluşturan iki saf metal olarak düşünürsek $T_B$,$T_A$ sırasıyla A ve B bileşenlerin saf haldeki ergime derecelerini, $T_Ö$ ötektik sıcaklığı ve $C_Ö$ ötektik bileşimi temsil eder. Bu faz diyagramı ve solundaki şematik ötektik yapı özelinde düşünüldüğünde ötektik bileşimdeki alaşım ($C_Ö$) sıvı bölgeden soğuyarak

ötektik sıcaklığa ($T_{ö}$) geldiğinde $\alpha$ ve $\beta$ olarak iki ayrı katıya dönüşür. Bu $\alpha$ ve $\beta$ fazları yan yana tabakalar halinde büyüme gösterir. Şekil2.10'da ötektik lamelsel büyümenin şematik gösterimi verilmiştir. Buna göre Şekil 2.10a'da A ve B elementlerinin katılaşma arayüzeyindeki difüzyon yolları şematik olarak gösterilmiştir. Bunlar en yoğun şekilde arayüzün yakınındaki noktalarda toplanır ve arayüzden uzaklık arttıkça daha az önem kazanırlar. Yanal difüzyon için karakteristik ayrışma mesafesi fazlar arası mesafenin($\lambda$) yarısı kadardır [29]. Yani özetle, A elementince zengin $\alpha$ fazının katılaşması sırasında B atomları sıvının içine itilirler ve B elementince zengin $\beta$ fazı oluşturulur. Benzer biçimde $\beta$ fazı önünde A atomları itilir ve $\alpha$ fazı oluşur. Şekil 2.10b'de B elementi atomları oluşan $\alpha$ lamelsel fazı önünde yavaşça artar ve bu esnada $\beta$ lamelsel fazı önünde zamanla azalma eğilimi gösterir. Şekildeki diyagrama göre katı-sıvı arayüzündeki konsantrasyon değişimi, fazlarla temas halindeki eriyiğin ergime sıcaklığında değişikliğe yol açar. Sıvı bileşimi $C_B$ nin $C_{ö}$ ye eşit olduğu noktalar tam olarak ötektik sıcaklıktadır. $\alpha$ fazının $\alpha$-$\beta$ arayüzüne yakın olduğu bu noktalar daha yüksek bir sıvı sıcaklığındadır. Çünkü bu bölgelerdeki sıvı yanal difüzyondan dolayı daha düşük bir B içeriğine sahiptir. Öte yandan $\beta$ fazının önündeki eriyik A'ca her zaman denge ötektik bileşiminden daha zengindir. Bu nedenle likidus sıcaklığı, denge ötektik sıcaklığına göre daha düşük olur ve artan $C_A$ değerleri ile birlikte azalır [29]. Arayüzdeki A ve B element atomlarının küçük mesafeli difüze oluşu sayesinde oluşan $\alpha$ , $\beta$ fazlarının ortaya çıkardığı tabakalı ötektik yapı Şekil 2.10c'de görülmektedir. Bu lamellerin genişlikleri V büyütme hızına ve difüzyonun hızına bağlıdır. Bu durumda katılaşma hızı ne kadar yüksek olursa ötektik tane boyutu da o oranda küçülür.




**Şekil 2.10** Lamelsel mikroyapıdaki ötektik büyümenin şematik gösterimi [55]

## 2.5 Ötektik Büyütmenin Teorik İncelenmesi

Çok bilşenli/fazlı alaşımların katılaştırılması akademik olarak hala araştırılmaktadır. Çok bileşenli ve çok fazlı sistemlerin katılaşma davranışlarının incelenmesi ve mekanizmanın ortaya konması, bu malzemelerin gösterebileceği özellikleri öngörmede ve daha da önemlisi belirlemede çok önemli katkı sağlar. Katılaşma ile ilgili yapılan çalışmlardan elde edilen temel bilgiler, özellikle saf ve ötektik/peritektik sınıf malzemelerden tek ve iki faz büyütülen ikili alaşım sistemlerinden elde edilen verilerdir. Bunun yanında katılaştırma sırasında çok fazlı büyütmelerde mikroyapı oluşumu konusunda daha az bilgi vardır [59].

Ötektiklerin doğrusal katılaştırılması düzenli lif, çubuk ve lamel tipli yapıları ortaya çıkarır. Bu yapıların büyüme mekanizmaları birbirinden farklıdır. Lifli ve çubuk ötektik yapıların büyümesi fazlardan birinin diğer fazın matrisi içine gömülü bir şekilde gerçekleşir. Lamelsel yapı büyümesinde ise iki faz ince lameller şeklinde birlikte yan yana büyüme gösterir. Günümüzde ikili ötektik alaşımların mikroyapı parametrelerini belirleme üzerine kabul görmüş iki büyük teorik model mevcuttur bunlardan biri Jackson-Hunt, JH diye anılan düşük hızdaki doğrusal katılaştırma sitemini ele alan teorik model[60]. Diğeri ise Trivedi-Magnin-Kurz, TMK olarak bilinen yüksek hızda doğrusal katılaştırma sistemi için geliştirilen teorik modeldir[61]. Bir üçüncü teorik model ise daha yakın tarihli olarak üçlü ötektik sıvıdan iki ötektik fazın büyümesi üzerine geliştirilmiş olan Wilde-Froyen-Witusiewicz-Hecht, WFWH teorik modelidir [62].

### 2.5.1 Jackson-Hunt, JH Teorik Modeli

Jackson-Hunt'ın önerdiği model, eşısıl(izotermal) bir katılaşma cephesi için ortalama ($\Delta T$), (V) ve ötektik lameller arası uzaklık($\lambda$) parametreleriyle ilgili ilişkiyi açıklamak üzerinedir[59]. Bu parametreler arasında ilişki:

$$\Delta T = K_1 V \lambda + \frac{K_2}{\lambda} \tag{2.39}$$

Burada $K_1$ ve $K_2$ alaşımın fiziksel parametreleridir.

$$K_1 = \frac{mPC_0}{f_\alpha \ f_\beta D} \tag{2.40}$$

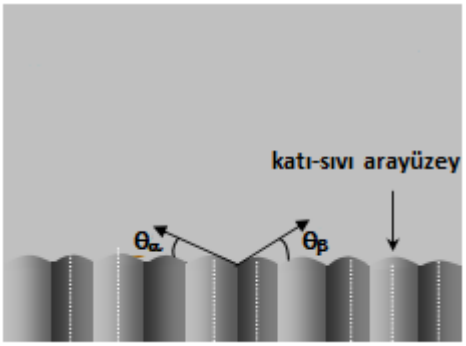
ve

$$K_2 = 2m\delta \sum_i \frac{\Gamma_i \sin\theta_i}{m_i f_i} \qquad (i=\alpha,\beta) \tag{2.41}$$

şeklinde gösterilir[63]. Burada m eşitliği ise:

$$m = \frac{m_\alpha m_\beta}{(m_\alpha + m_\beta)} \tag{2.42}$$

Burada $m_\alpha$ ve $m_\beta$ ötektik sıcaklıkta α ve β sıvılaşma eğrilerinin eğim büyüklüğüdür. $C_0$ ,α ve β fazlarının bleşim farkıdır. $f_\alpha$ve$f_\beta$ ise α ve β fazlarının hacim kesirlerini ifade eder. $\Gamma_i$ Gibbs-Thomson katsayısıdır. $\theta_i$ açıları şekil 2.11'da gösterilmiştir.




**Şekil 2.11** Ötektik büyümedeki temas açıları şematik gösterimi

δ , model gereği lamelsel büyütmede 1, çubuksal büyütmede 2 $\sqrt{f_\alpha}$ 'ya eşittir[63]. P, Peclet sayısıdır ve şu şekildedir:

$$P = \begin{cases} 0{,}3383(f_\alpha f_\beta)^{1{,}661} & lamelsel\ ötektikler\ için \\ 0{,}167(f_\alpha f_\beta)^{1{,}25} \quad 0 \le f_\alpha \le 0{,}3 & çubuksal(rod)\ ötektikler\ için \end{cases} \tag{2.43}$$

Buna ek olarak büyüme koşulunun minimum alt soğumada uygulandığı düşünülerek, $(\partial\Delta T/\partial\lambda)_V=0$

alttaki bağıntılar geliştirilmiştir:

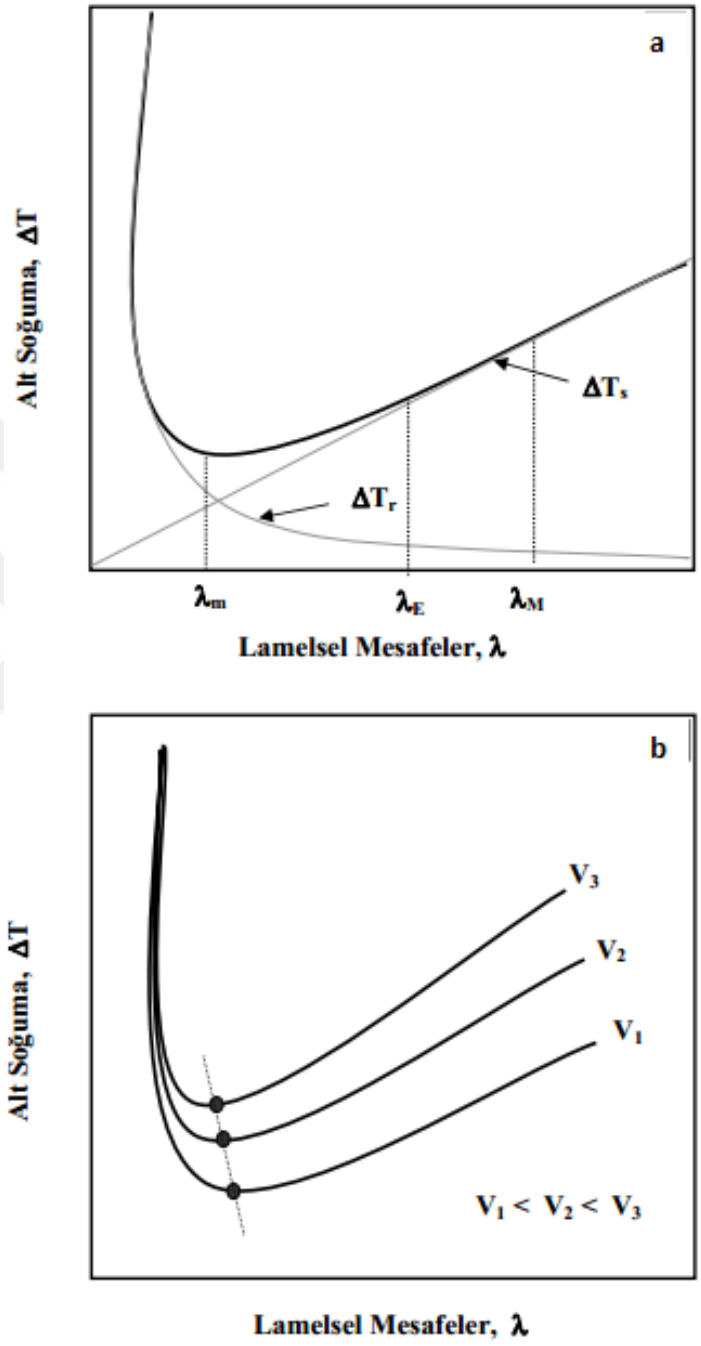
$$\lambda_M^2 V = K_2 / K_1 = sabit \tag{2.44}$$

$$\frac{\Delta T^2}{V} = 4K_1K_2 = sabit \tag{2.45}$$

$$\lambda_M \Delta T = 2K_2 = sabit \tag{2.46}$$

Burada $\lambda_M$ en yüksek ötektik mesafe ve ΔT alt soğumadır. Yapılan çalışmlar ötektik mesafe, büyüme hızı ve alt soğuma arasındaki deneysel olarak da doğrulanmış ilişkiyi verir ve büyüme hızı ve alt soğumanın birlikte veya ayrı ayrı değişmesi çubuksal boşlukların değiştirecek etki sağladığını söyler. Başka bir anlatımla bu

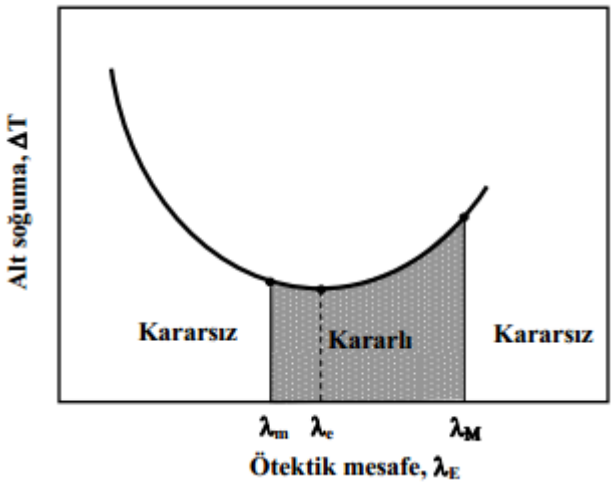
model kararlı ötektik mesafe aralığının $\lambda_m < \lambda_E < \lambda_M$ şeklinde olduğunu ifade eder(şekil 2.12). Burada $\lambda_m$ en düşük ötektik mesafe, $\lambda_E$ ötektik mesafe ve $\lambda_M$ en yüksek ötektik mesafe.




**Şekil 2.12** JH modeline göre altsoğuma ile lamel mesafeler arasındaki ilişki, a)eğrilik ve çözünürlük farkının tesiri, b) değişen soğutma hızlarında lamel aralıkların değişimi [55]

JH modelinden: $\lambda_E$ değeri, $\lambda_m$ ie $\lambda_M$, değerleri içerisinde olduğunda söz konusu ötektik mesafe kararlıdır(şekil 2.13) ve bu mesafenin kararlı olduğu kabul edildiğinde yukarıdaki hesap ve eşitlikliklerden yola çıkarak ifade eşitlik (2.47) deki gibi yazılır:

$$\lambda_{E_j}^2 V = sabit \qquad j = m \; veya \; M \tag{2.47}$$




**Şekil 2.13** Sabit bir katılaştırma hızı için altsoğuma ve ötektik mesafe ilişkisi, kararlı-kararsız bölgeler [55]

### 2.5.2 Trivedi-Magnin-Kurz, TMK Teorik Modeli

Yukarıda bahsedilen JH teorik modeli düşük büyütme hızları için geliştirildiğinden yüksek hız bölgleri için deneysel çalışmalara tam cevap verememektedir. Çoğu ötektik sistem ise yüksek yüksek hızlarda büyütülmektedir. Bu sebepten Trivedi-Magnin-Kurz kendi isimleriyle anılan bu ötektik teorik modelde[61] JH modelini geliştirirerek yüksek hız bölgeleri için de deneysel sonuçlarla uyum sağlayabilecek model sunmuşlardır. TMK modeline göre hacimsel büyütme:

$$\lambda_E^2 V = \phi^2 K_2 \; / \; K_1 \tag{2.48}$$

Eşitliği şeklindedir. Burada $\phi$ ötektik mesafenin($\lambda_E$) en yüksek mesafeye($\lambda_M$) oranıdır.

$$\frac{\Delta T}{\sqrt{V}} = \left( \phi + \frac{1}{\phi} \right) \sqrt{K_1 K_2} \tag{2.49}$$

$$\lambda_E \Delta T = (\phi^2 + 1) K_2 \tag{2.50}$$

olarak ifade edilir. (JH modelinde tanımlanan $K_1$ ve $K_2$ sabitleri eşitlik 2.42'de yerine yazılırsa)

$$\lambda_E = \phi \left[ \frac{2D}{P \Delta C_0 V} \sum_i \left( \frac{\Gamma_i \sin \theta_i}{m_i f_i} \right) \right]^{0.5} \qquad i = \alpha, \beta \tag{2.51}$$

Ötektik mesafe bağıntısı verilir[61]. Bu bağıntı TMK teorik modelin lamelsel ötektik mesafeler için öngördüğü teorik modeldir. Burada $\Delta C_0$ büyüyen arayüzeydeki $\alpha$ ve $\beta$ fazları arasındaki bileşim farkıdır.

### 2.5.3 Hunt-Lu, HL Teorik Modeli

Hücresel ve dendritik katılaştırma üzerine teorik modellerden bir tanesi de Hunt ve Lu'nun birlikte geliştirdikleri modeldir[64]. Bu modelde hücresel ve dendritik boşlukları, alt soğumaları ve yapılar arasındaki geçişi tahmin edebilen numerik bir model geliştirilmiştir. Başka bi ifadeyle numerik bir model kullanılarak hücresel veya dendritik düzende büyümeler gösteren sistemler için incelemelerde bulunulmuş ve elde edilen analitik değerler numerik sonuçlara uygun hale getirilmiştir. HL modeline göre birincil dendrit kol mesafesi eşitlik (2.46)'de gösterilmiştir:

$$\lambda_1 = 0,07798 V'^{(a-0,75)} (V' - G')^{0,75} G'^{-0,6028} \tag{2.52}$$

Burada; $\lambda' = \lambda \Delta T_o / \Gamma k$ , $G' = GTk(\Delta T_o)^2$ , $V' = V\Gamma k / D\Delta T_o$ ,

$\Delta T_o = mC_o(k-1)/k$ ve $a = 1,131 - 0,1555 \log G - 0,007589 (\log G')^2$ ifadeleridir.

Yapılan çalışma hücresel ve dendritik büyüme süreçleri hakkında fikir verir ve teoriyi deneyle karşılaştırmak için yararlıdır. Bulunan ifadeler bu iki sistem(hücresel ve dendritik) için katılaştırma süreçleri hakkında bilgi edinmek,

teoriyi deney ile kıyaslayabilmek ve tahminlerin sistemin fiziksel özelliklerine duyarlılığını ölçmek için kullanılabilir [64].

### 2.5.4 Wilde-Froyen-Witusiewicz-Hecht, WFWH Teorik Modeli

Daha yakın tarihli olan bu çalışma iki ötektik fazın üçlü ötektik sıvıdan büyümesi üzerine mikroyapı parametrelerini öngörme üzerine Wilde ve arkadaşları tarafından JH modelinden geliştirilerek önerilmiş modeldir [62]. Üçlü ötektik sıvılardan doğrusal katılaştırma sonucunda iki ötektik faz tabakalı ve düzgün büyüdüğü durumdaki içyapı parametrelerini öngörme üzerinedir [62]. Bu modele göre V ve λ ilişkisi:

$$\lambda^2 V = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin^2(i\pi f_\alpha)}{i^3\pi^3}} \left[ \frac{\Gamma_\alpha \sin\theta_\alpha}{\frac{|m_B^\alpha|}{D_b}\left|C_B^\alpha + C_B^\beta\right| + \frac{|m_C^\alpha|}{D_C}\left|C_C^\alpha + C_C^\beta\right|} + \frac{\Gamma_\beta \sin\theta_\beta}{|m_A^\beta|\left|\frac{C_B^\alpha + C_B^\beta}{D_B} + \frac{C_C^\alpha + C_C^\beta}{D_C}\right| + \frac{|m_C^\beta|}{D_C}\left|C_C^\alpha + C_C^\beta\right|} \right] \tag{2.53}$$

olarak verilmiştir. Burada Γ Gibbs-Thomson katsayısı, m likidüs çizgisi eğimi, C alaşımın konsantrasyonu, D sıvıdaki difüzyon katsayısı, A, B, C alt simgeleri farklı bileşenleri simgeler. α ve β ise üçlü ötektik sıvıdan büyüyen herhangi iki fazdır. Burada eşitlik 2.46 sadece seçilen alaşımın sabit değerlerine bağımlıdır. Diğer yandan şimdiye kadar üçlü ötektik sıvılardan üç ayrı fazın büyümesindeki mikroyapı parametrelerini öngörme üzerine herhangi bir teorik model geliştirilmemiştir.

## 2.6 Ötektik Yapıların Sınıflandırılması

Konuyla ilgili bilim insanları tarafından farklı kriterlere göre birçok ötektik sınıflandırma önerilmiştir [65]–[69]. Yapılan ilk sınıflandırma büyüme

mekanizmalarına göre işbirlikçi (cooperative) büyüme ve ayrı (divorced) büyüme şeklindedir.

- **İşbirlikçi büyümede** ötektiğin iki fazı bir difüzyon çifti olarak birlikte büyür.
- **Ayrı büyümede** ise ötektiğin iki fazı ayrı ayrı büyür, iki katı fazın arasında doğrudan bir çözünen madde değişimi ve üçlüleşme yoktur [20].

Başka bir sınıflandırma Hunt ve Jackson tarafından ötektik bileşen fazların arayüz kinetiğine dayanarak önerilmiştir[20], [60]. Bu öneriye göre düşük erime entropisine ($\Delta S_f$) sahip olan fazlar düzlemsiz (nonfaceted) bir arayüzle katılaşırken yüksek erime entropisine sahip olan fazlar düzlemli(faceted) arayüz ile katılaşır. Düzlemsiz-düzlemsiz, düzlemsiz- düzlemli ve düzlemli-düzlemli ötektiler olarak üç grupta incelenmiştir. İlk iki kategori yaygındır ve ticari uygulamaları mevcuttur. Düzlemli-düzlemli ötektikler daha az çalışılmıştır [20].

- **Düzlemsiz-düzlemsiz ötektikler:** Burada her iki fazın erime entropisi 2R den düşüktür(R, üniversal gaz sabiti). Yalnızca düzgün tabakalı veya lifli içyapılar meydana gelir. Buna metalik örnekler Pb-Sn, Cd-Zn, Cd-Sn verilebilir.
- **Düzlemsiz-düzlemli ötektikler:** Bu tipte ise fazlardan biri 2R den daha düşük erime entropisine sahipken diğeri 2R den büyük ergime entropisi değerlerindedir. Bu çeşit yapılarda düzensiz veya karmaşık düzene sahip olarak tarif edilen yapılar gözlenir. Bi-Sn, Bi-Pb, Al-Si yapıları örnektir.
- **Düzlemli-düzlemli ötektikler:** Burada ise her iki fazın da erime entropisi 2R den büyüktür.Çoğu metal, yüksek entropi füzyonuna sahip olmadığından, bu tip ötektik, metal olmayan malzemelerde yaygındır. İki fazın büyümesinin anizotropisi dallanma zorluklarına yol açar ve bu nedenle düzensiz veya anormal tipte bir yapı oluşur.

Croker ve arkadaşları erime entropisine ek olarak, iki fazın hacim fraksiyonunun ($V_F$) ortaya çıkan mikroyapıda önemli bir rol oynadığını ileri sürmüşlerdir. Croker ve arkadaşları[67], [68] ötektik yapıları sınıflandırırken, Hunt ve Jackson modelini temel alarak kendi modellerini geliştirmişler ve normal ve anormal ötektik olmak üzere ikiye ayırmışlardır. Söz konusu modelde ötektik bölgelerin düzlemli olup

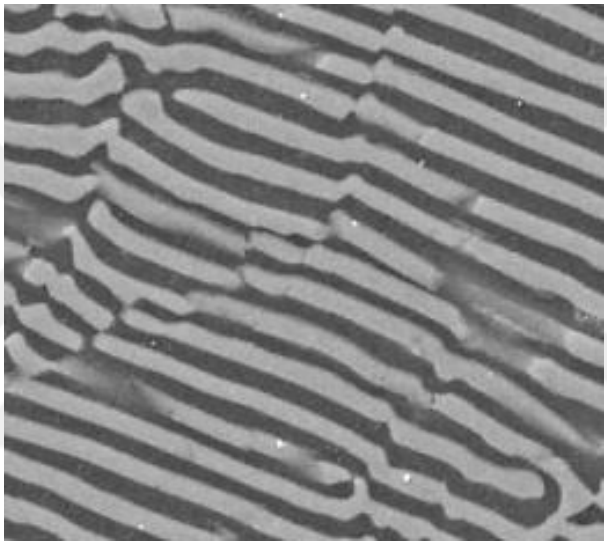
olmamasını ötektik noktadaki fazın dönüşümünün entropisi ile ilgili olduğunu bulmuşlardır(dönüşüm sıcaklığındaki entropi $\Delta S_{\alpha} \geq 23 Jmol^{-1}K^{-1}$ ise faza düzlemli olarak adlandırlır). Bu fazın hacim oranı $V_F$; sıcaklık gradyentİ, katılaştırma oranı ve bileşim değerlerine bağlı olarak normal ya da anormal ötektiklerin mikroyapıları değişir [67], [68].

### 2.6.1 Normal Ötektikler

Düzenli (regular) ötektik olarak da anılan normal ötektiklerde iki katı faz ergiyikten aynı anda işbirliği yaparak büyür ve katılaşır. Her faz ortak kat-sıvı arayüzeyleri boyunca difüzyon alanlarını büyüterek gelişirler. Bu ötektik tipinde gözlenen mikroyapılar tipik olarak lamelsel (plaka benzeri) veya çubuk formundadır. Yani fazlar ya geniş lamellar (plakalar) olarak gelişir ya da bir kristalin faz ikinciye göre hacim fraksiyonu olarak baskın gelirse ikincil faz uzun çubuklar ya da iğnesel (katılaştırma yönünde) formda büyür. Burada hem α fazı/eriyik arayüzü hem β fazı/eriyik arayüzü için ikiden az olan arayüzey alfa faktörlerine sahip olduğu düşünülür. Bu durum iki arayüzün izotermal olması ve denge ötektik sıcaklığına makul derecede yakın bir izoterm boyunca hizalanması gerekliliği ile tutarlıdır. Her iki fazın küçük alfa faktörleri üzerindeki bu ısrarı normal ötektikleri oldukça simetrik kristal yapılara (YMK, HMK ,HSP) sahip alaşımlarla sınırlar. Dolayısıyla normal ötektikler çoğunlukla metalik alaşımlı sistemlerde görülür [70].

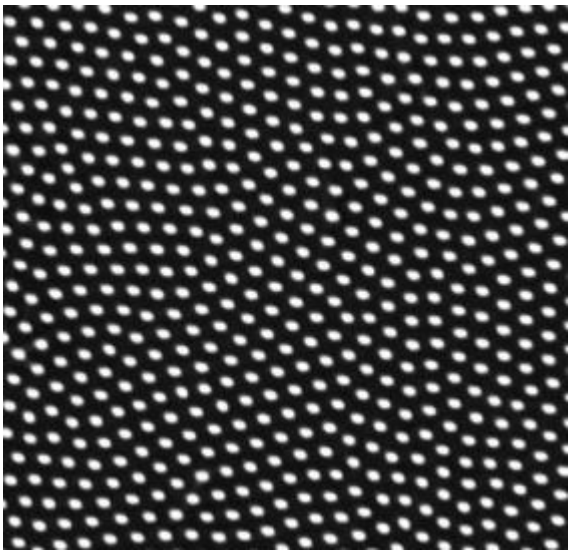
Normal ötektiklerin yapı morfolojisi denge şartlarında büyüme sonucu oluşur. Normal ötektikler düşük dönüşüm entropisine sahip olup iki fazla ilişkilidir. Bu durum fazların kolay büyümelerine (dallanmalarına) yol açar ve normal ötektik yapısı oluşur. Çok düşük aşırı soğuma α ve β tabakalı yapıları ya da lifli yapıları oluşturur. Normal ötektiklerde düşük hacim fraksiyonlu faz lifli büyümeyi tercih ederken daha yüksek hacim fraksiyonlu olan tabakalı (lamelsel) büyümeyi tercih eder. Bunun nedeni, lamelsel ötektiklerdeki arayüzey alanı hacim fraksiyonundan bağımsızken, çubuksal ötektiklerde arayüzey hacim fraksiyonu azaldıkça azalır. Denge koşullarında, sıvıda bir bileşim gradyenti söz konusudur. Bu gradyent büyüme sırasında katı-sıvı arayüzeyden difüze olan bileşimin A ve B atomlarıyla oluşur. Bu nedenle tabakalı veya lifli rod fazların mesafesi ($\lambda_E$) korunmuş olur[69]. Normal ötektiklerin iki ana tip morfolojisi lamelsel ve çubuksal yapılardır.

**Lamelsel Yapı**: Düzenli bir şekilde tekrarlanan alternatif katmanlardan veya lamellerden oluşan, uzun mesafeler boyunca uzanabilen fakat kristal hatalarla kesilen mikroyapılardır. Lamelsel mikroyapıya en iyi örneklerden biri olan Al-%33Cu bileşimi şekil 2.14'de verilmiştir. Lamelsel yapılarda, denge durumunda $\alpha$ fazının B atomlarını itme hızı ile $\beta$ fazının A atomlarını itme hızı birbirine eşittir (A ve B iki bileşen). Jackson and Hunt[60] bu düzenli katılaşmayı düzlemsel ve arayüzeydeki altsoğumada, sabit bir katılaşma hızında denge durum büyümesi olarak var sayarak analiz etmişlerdir. Lamelsel büyümede, arayüzeydeki altsoğuma ($\Delta T$) bireysel altsoğuma katkısının toplamı olarak düşünmüşlerdir.



**Şekil 2.14** Lamelsel mikroyapıya örnek Al-%33Cu ötektik alaşımının sem görüntüsü [42]

**Çubuksal Yapı**: Çubuksal ötektik yapıda da lamelsel ötektik yapıya benzer şekilde bir büyüme söz konusudur. Bir hata ile kesilmediği sürece katılaştırma şartlarına bağlı olarak mesafelerce uzayabilen düzenli fiberlerden meydana gelen bir yapıdır. Fiberler katılşama yönü doğrultusunda birbirine paralel ve düzenli bir yapı oluştururlar.Yapı düzenli olmakla birlikte faz içerisindeki dik kesitleri çok köşeli ve çubuksaldır. Jackson and Hunt[60] bir fazın hacim fraksiyonu yeterince küçük olduğunda çubuk morfolojisinin lamelli morfolojiden daha düşük alt soğumalarda büyümesi gerektiğini önerirler. Şekil 2.15 çubuksal mikroyapıya örnektir [71].



**Şekil 2.15** Çubuksal mikroyapı örneği, NiAl-9Mo alaşımının sem görüntüsü [71]

### 2.6.2 Anormal Ötektikler

Anormal(ırregular) ötektiklerde ötektik fazların biri veya her ikisi ikiden büyük arayüze alfa faktörüne sahip olduğu söylenebilir. Bu tipteki ötektik bileşimlerin döküm mikroyapıları çok büyük farklılıklar gösterir [70].

Normal ötektik sistemlerle ilgili kabul gören modeller (özellikle tabakalı sistem) genelde Jackson ve Hunt kaynaklı çalışmalarken[60] anormal olarak adlandırılan düzensiz ötektik büyümeyi modelleme üzerine yapılan çalışmaların en kapsamlı olanı Mgnin ve Trivedi'dir [72]. J. Liu ve R. Elliot anormal ötektik büyüme için kavisli bir arayüzde çözünen difüzyonun artan zorluk derecesini ve arayüzün sıcaklığındaki değişikliği dikkate alarak sayısal hesaplamalar sunmuşlardır[73]. Anormal ötektiklerdeki farklı boşlukların, farklı katılaştırma hızları veya farklı alt soğumalar ile ilişkilendirilebileceğini öne sürmüşlerdir. Diğer yandan birincil faz ikincil faz için çekirdekleştirici ajan olarak işlev göremediğinde düzensiz yapılar oluşur [74]. İkincil faz ergiyik içerisinde heterojen olarak rastgele yönlenmiş şekilde çekirdekleşir.Anormal ötektikleri de kendi çerisinde aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür [25].

**Kesikli lamelsel yapı:** Neredeyse düzenli kırılmış bir plaka (lamel) dizisinden oluşur ve ana fazın (düzenli, faceting phase) hacminin <10% 'unun içeren sistemlerde görülür. Minor faz iki boyutlu mikroyapıda kırık lameller olarak

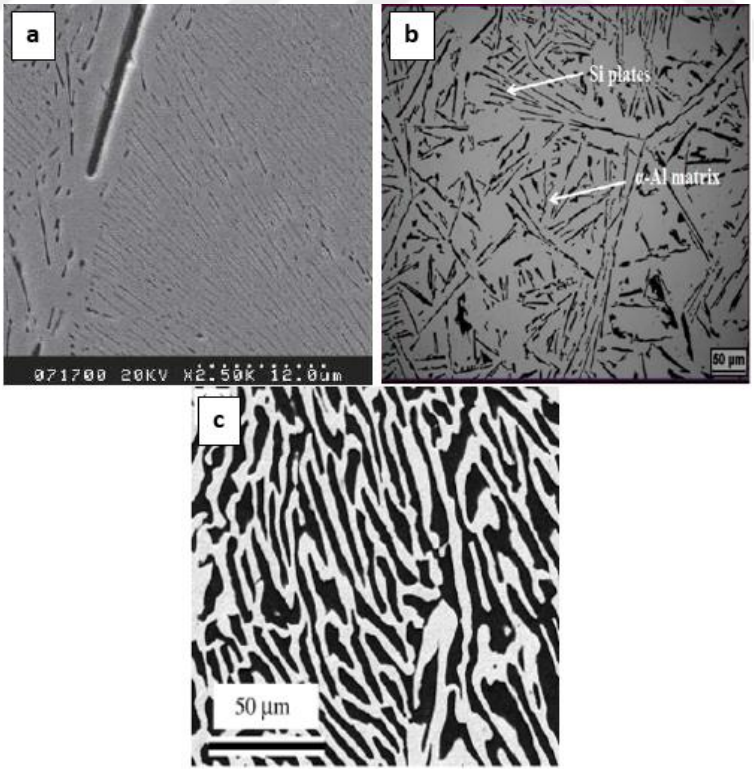
görünürken taramalı elektron mikroskobuyla incelendiğinde fazın sürekli olduğu düzensiz (non-faceting) fazın tıkanıklığı yenmek ve sürekliliğini korumak için sık sık şeritler veya plakalar olarak dallandığı görülür. Örnek bileşimler: Zn-Sn, Ag-Pb, $Ag_3Sn$-Sn, W-Ni.

**Düzensiz fleyk yapı:** Bu yapı Al-Si, Pb-Sb, Al-$FeAl_3$ gibi birçok endüstri için önemli döküm alaşımlarında görülür.Hızlı bir katılaştırma veya modifikasyon sonucu lifli bir yapı oluşur.

**Karmaşık düzenli yapı:** Yapı sıvı-katı arayüzeyde makro-yüzlü bir çıkıntının büyümesinden kaynaklanır. Hücresel yapılar düzenli fazın maruz kaldığı büyüme kısıtlamaları nedeniyle arayüzde yapısal aşırı soğutma varlığının bir sonucu olarak oluşur. Hücresel yapı oluşumu yapısal stabilitiyi artırır.

**Yarı düzenli yapı:** Düzenli fazın hacim fraksiyonu bazı sistemlerde (Bi-Sn, Sb-ZnSb) %40 a doğru yükseldikçe daha yüksek büyüme hızlarında yarı düzenli yapılar oluşturma eğilimi söz konusudur.

Anormal ötektiklere ait bazı örnek mikroyapı fotoğrafları şekil 2.16'da verilmiştir.




**Şekil 2.16** Bazı anormal ötektiklere ait örnek görüntüler, a) kesikli lamelsel yapı(Sn-Zn)[75] b) Düzensiz fleyk yapı (Al-Si)[76] c) yarı düzenli yapı(Bi-Sn) [77]

## 2.7 Özet

Yukarıdaki tüm açıklama ve tanımlamalardan anlaşılacağı üzere ötektik sistemlerin katılaştırılmasında ve mikroyapılarının karakterize edilişinde kontrol parametreleri; bileşim ($C_0$), sıcaklık gradyenti (G) ve katılaştırma hızıdır (V). Metalik malzemelerin endüstride çok fazla tercih ediliyor ve kulanılıyor olması öncelikle mekanik dayanımlarından kaynaklanır. Bu dayanımların istenilen özelliklere göre yukarıda anılan parametrelerin kontrolü ile sağlanması ve üretilebilmesi metalik alaşımları rakipsiz kılmıştır. Öncelikle makro boyutu ele alındığında metallerin tane boyutları ile dayanımları arasında sıkı bir ilişki söz konusudur. Bu ilişkiyi en genel tarif eden eşitlik Hall-Petch eşitliği olarak bilinen akma noktası ve tane boyutu arasındaki ilişkiyi veren eşitliktir:

$$\sigma_A = \sigma_0 + \frac{k_a}{d^{1/2}} \tag{2.54}$$

Burada $\sigma_A$ akma dayanımı, $\sigma_0$ ve $k_a$ malzeme sabitleri, d ise yapının tane boyutudur. Buna göre akma dayanımını arttırmak malzemenin ntane boyutunun küçültülmesiyle ilişkilidir.

Metal bilimcileri gün geçtikçe daha mukavim metalik malzemeler üretme üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler. Gelinen noktada geleneksel katılaştırma parametrelerine ($C_0$, G, V) ek bazı elektrik akımı, lektrik pulsu, manyetik alan, manyetik alan pulsu, elektromanyetik alan gibi dış fiziksel kuvvetlerin katılaştırma sırasında uygulanması bu doğrultuda sonuç vermiştir [11]–[16], [78]–[85].

Bu dış fiziksel etkilerin uygulanmasındaki bazı avantajlar şu şekilde sayılabilir [14];

- Öncelikle yeşil üretim teknolojileridir. Çünkü katılaşmadan sonra alaşımların içerisinde artık veya zararlı bir malzeme kalmaz [86]. Eriyik ve güç kaynağı arasında herhengi bir temas olmadığından temiz bir üretim süreci sunar [87], [88].
- Elektromanyetik kuvvetin etkisi sadece eriyikteki elementlerin ve fazların elektrik iletkenliklerindeki yani elektrik yükleri arasındaki farka bağlıdır. Ancak kimyasal bileşime veya katı-sıvı gibi faz durumlarına bağlı değildir.

Bunların yanında şu bazı dezavantajlardan da bahsedilebilir [14]:

- Eriyikle doğrudan temas ettirilmesi gereken tekniklerde kullanılan aparatların problarının eriyiğe daldırılması yada sabitlenmesi.
- Cihazın batırılan kısmının eriyiği kirletme riskleri ve aparatların yüksek sıcaklıktan kaynaklı alabilceği hasarlar.
- Yine doğrudan temas tekniklerinde uygulanacak olan eriyik hacmi sınırlayıcı olabilmektedir.
- Temazsız tekniklerde ise malzemeye etki etmek adına çok yüksek akım veya voltajlara çıkmak gereklidir. Bu da yüksek enerji sarfiyatı anlamına gelir.

Bunlara ilaveten; eksiklik olarak, yapılan çalışmalara bakıldığında genellikle elektromanyetik kuvvetten yararlanıldığı gözlenmektedir. Özellikle statik elektrik alan uygulamaları çok sınırlıdır. Ayrıca bu dışsal fiziksel alanın doğrudan katılaştırma yönünde uygulanması, -yani katı-sıvı büyüme yönünde (+y doğrultusu) veya bunun tersinde (-y doğrultusu)- ve etkilerinin gözlenmesi yönünde literatürde büyük bir boşuk söz konusudur.

Son dönemde Liu ve arkadaşları[16] tarafından yapılan çalışmada statik elektrik alanın Al-Cu katılaştırılması üzerine etkisi incelemişler ve elektrik alanın atom difüzyonuunu hızlandırdığını, elektrik alanın tane boyutlarını artırdığını, hacim fraksiyonunu düşürdüğünü rapor etmişlerdir.

Bu çalışma statik elektrik alanın malzemelerin iç yapısına etki edebileceği yönünde önemli bir çalışmadır. Fakat çalışmaya bakıldığında uygulanan elektrik alan katı-sıvı arayüzeyinin büyüme doğrultusuna dik uygulanmış bu da elektrik alanın atomların geçişleri üzerindeki asıl etkisini görmede yetersiz kalabilir.

Mevcut çalışmada yukarıda anılan dezavantajları gidererek durgun elektrik alanın katılaşma yönünde etkisini incelemek üzere yeni bir sistem dizayn edilmiştir. Bu dizayn sırasında sistemin endüstriyel üretime de uygun olması göz önünde bulundurulmuştur. Uygulanan durgun elektrik alanının mikroyapıya etkisini açık bir şekilde gözlemek için alanın doğrultusunun katı-sıvı arayüzeyin büyüme doğrultusunda olması ve miroyapıları çok iyi bilinen Al-Cu ve Al-Ni tam ötektik bileşimleri tercih edilmiştir. Bu sayede farklı tipteki ötektik morfolojiye sahip

yapılardaki etki de incelenmiş ve literatüre kazandırılmış olacaktır. Deneysel süreç ve deneylerin yapılışı, öncelikle yenilikçi deneysel tasarımın anlatımıyla başlanarak alt bölümlerde sunulacaktır.

# 3
# DENEYSEL SİSTEM VE YÖNTEM

## 3.1 Giriş

Geleneksel katılaştırma parametreleri ($C_0$, G, V)'nin malzeme özellikleri üzerine etkisini incelemek üzere çok sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır. Son dönemde ise bunlara ek olarak dışsal fiziksel etkilerin malzemelerin mikroyapı, mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkileri araştırılmakta ve yeni yöntemler arayışı devam etmektedir. Bu çalışmada mikroyapıları çok iyi bilinen Al-%33Cu(Ağ) ve Al-%6,4Ni(Ağ) alaşımları düzgün durgun yüksek elektrik alan altında doğrusal katılaştırılması ve mikroyapı (ötektik mesafeler, $\lambda$ ve ötektik tane boyutları, ÖTB) ve mekanik (sertlik ve çekme dayanımları) özelliklerinin durgun elektrik alana bağlılığının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu bölümde bu amaca ulaşmak için tasarımı yapılan ve deneysel çalışmalarda kullanılan deneysel sisem ve yöntem hakkında detaylı bilgi verilecek ve deneysel bir süreç basamaklarıyla izah edilecektir.

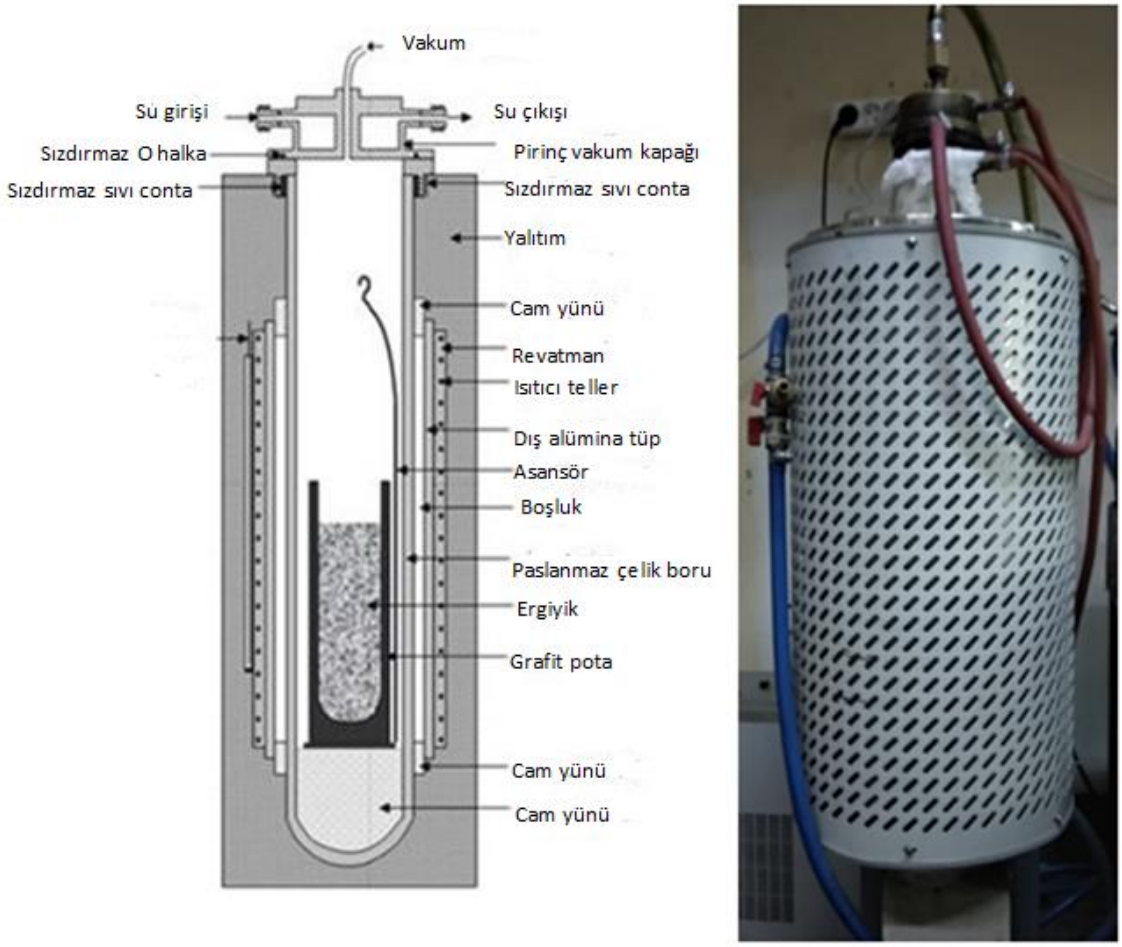
## 3.2 Deneysel Sistem

Bu başlık altında öncelikle alaşımların hazırlandığı ve durgun elektrik alan altında katılaştırılmadan önce numunelerin içinde ergitildiği vakum atmosferli ergitme fırını anlatılacaktır. Bununla birlikte çalışmanın yenilikçi yönünü ortaya koyan inovatif tasarlanmış ve hassas olarak kurulumu yapılmış yüksek durgun elektrik alan altında katılaştırma sistemi ayrıntılı olarak tanıtılacaktır.

### 3.2.1 Vakumlu Alaşımlandırma Fırını

Alaşımlar hazırlanırken metallerin açık atmosferde oksitlenmemesi ve sorunsuz bir şekilde hazırlanması için alaşım hazırlama işlemi vakum altında vakum atmosfer fırınında gerçekleştirilmiştir (şekil 3.1). Vakumlu ergitme fırını Protherm firmasından 1200 $^0$C sıcaklığa çıkabilen iki ucu açık dikey tüp fırın ve kontrolcüsü temin edilip modifiye edilmesiyle oluşturulmuştur. Isıtıcı tellerin sarılı olduğu dış alümina tüpün içine vakum atmosferinin sağlanacağı bir başka tüp koymak

gereklidir. Bunun için alışılagelmişin dışında, termal şok direnci çok iyi olmayan başka bir alümina tüp yerine çalışma sıcaklıklarında herhangi bir deformasyona uğramayacak olan termal şoka dayanıklı ve korozyon direnci yüksek bir ucu kapalı paslanmaz çelik boru dış alumina tüp içine yerleştirilmiştir. Bunun için; 60,4mm dış çap, 57mm iç çap ve 700mm uzunluğa sahip paslanmaz çelik boru temin edilmiş ve bir ucuna 4mm kalınlıkta paslanmaz çelik disk kaynak edilmiştir.




**Şekil 3.1** Vakum altında ergitme fırını şematik gösterim ve resmi

Bu şekilde bir ucu kapalı sızdırmaz paslanmaz çelik boru oluşturulmuş ve sızıdırmazlığı basınçlı hava ile su dolu küvet içinde kontrol edilmiştir. Vakum ortamının oluşturulması için bu paslanmaz çelik borunun açık ucuna pirinç malzemeden imal edilmiş, soğutmalı, iki parçalı vakum kapağı yapılmıştır (şekil 3.1). Bu kapağın alt parçası paslanmaz çelik borunun açık ucuna sızdırmazlık için $300^0$C 'ye dayanıklı sıvı formda yüksek sıcaklık contası kullanılarak yapıştırılmıştır. Isıtmalar sırasında bu contanın yanmaması için pirinç aparatın içinden su

dolaştırılmıştır. Pirinç kapağın üst parçası vakum pompasına bağlanmış ve iki parça sızdırmaz o ringler ile birbirine kapatılarak vakum atmosfer ortamı oluşturulmuştur. Oluşturulan fırın ile $\pm 1^0$C hassasiyetle ve vakum pompası sayesinde $10^{-3}$ mbar basınçta vakum ortamı sağlamaktadır.

### 3.2.2 Yüksek Durgun Elektrik Alan Altında Eksenel Katılaştırma Sistemi

Alaşımların yüksek elektrik alan altında katılaştırılması için inovatif, özel olarak bir deney sistemi tasarlanmış ve hassas bir şekilde kurulumu gerçekleştirilmiştir. Elektrik alanı, alaşımların katılaştırma doğrultusunda uygulanacak şekilde dizaynı sağlanmıştır. Çünkü katılaştırma doğrultusunda uygulanacak olan dışsal bir kuvvet doğrudan atom veya moleküllerin transferine etki edecek, transferi yavaşlatıcı veya hızlandırıcı bir etki gösterebilecektir. Böylece uygulanacak olan elektrik alan ve kuvvetin, malzemelerin katılaştırılması üzerine olan etkisi net bir şekilde ortaya konacaktır.

Güvenlik ve edüstriyel açıdan kullanıma uygun olması için sistemin tüm parçaları özel malzemelerden seçilmiştir. Elektrik alan kuvvetini oluşturacak, taşıyacak malzemeler ısıya dayanıklı kolay sabitlenebilen yüksek iletkenliğe sahip parçalardan oluşurken diğer parçalar güvenlik açısından yalıtkan malzemelerle donatılmıştır. Her ihtimale karşı sistemi koruyan bağlantı aparatlarının da topraklaması sağlanmıştır. Sistem optimizasyonu sonrası seri deneysel çalışmalara geçilmiştir.

Deneysel sistem; ısıtma bölgesi, silindirik soğutma tankı ve statik yüksek elektrik alan sistemi olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.

### 3.2.3 Isıtma Bölgesi

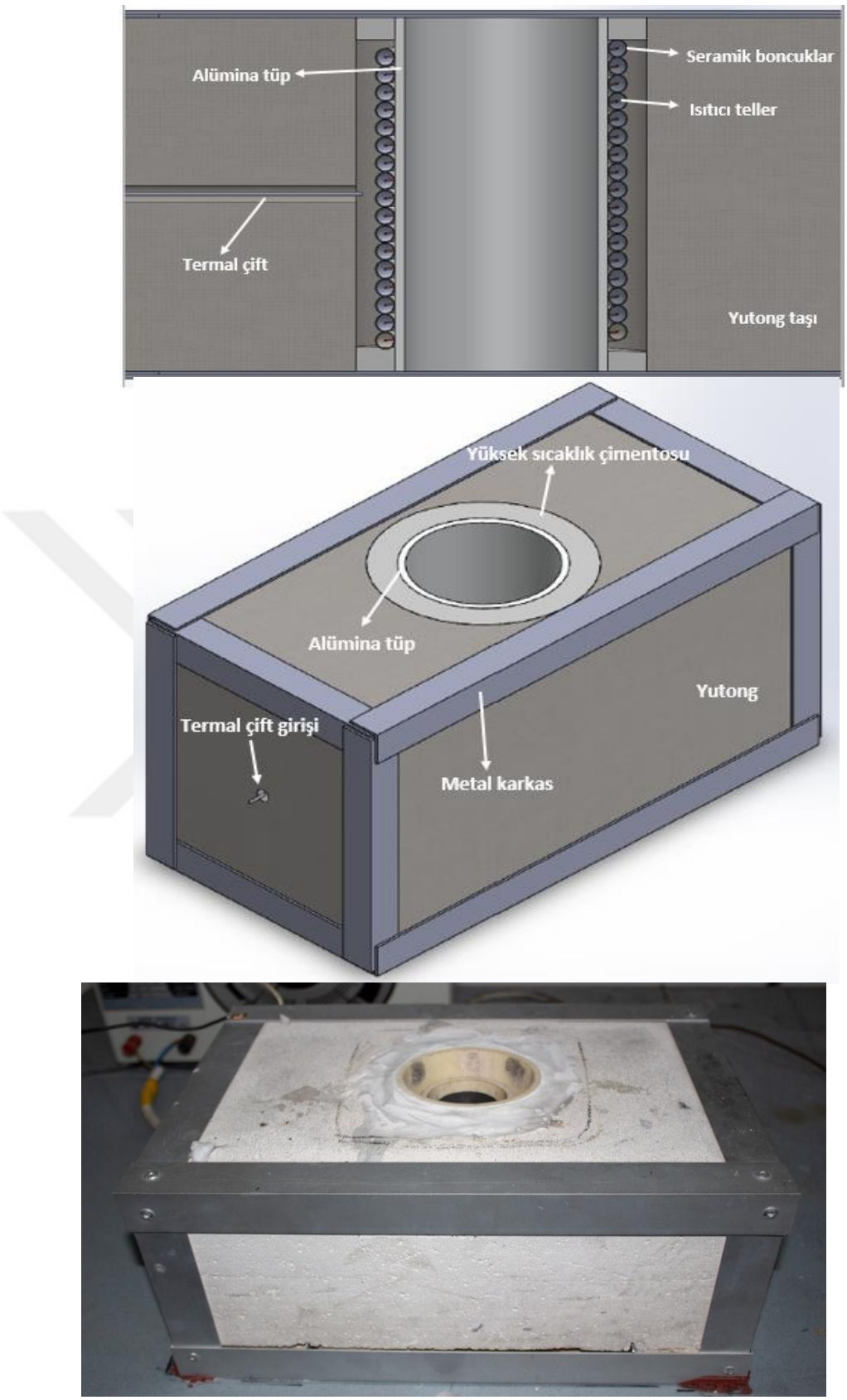
Sıvı alaşımın hazırlandığı vakumlu ergitme fırınından çıktıktan sonra deneysel sistemde elektrik alan altında hemen katılaşmaması için ortam sıcaklığının en az katılaştırılacak alaşımın ergime sıcaklığının yaklaşık $30^0$C-$50^0$C üzerinde bir sıcaklıkta tutulması gerekir. Bunun için öncelikle deneysel sistem için, uygulanacak deney sıcaklıklarını sağlayabilecek rezistanslı bir fırın yapılmıştır. Fırının rezistans bölümü(ısıtıcı bölge), 90mm içi çap 110mm dış çapa sahip ve 150mm uzunluğunda bir alumina tüpe seramik boncuklarla izole edilmiş 0,8mm kalınlığında Kanthal-A

direnç telleri sarılarak yaklaşık 15-17Ohm'luk dirence sahip bir ısıtıcı bölge hazırlanmıştır (Şekil 3.2).



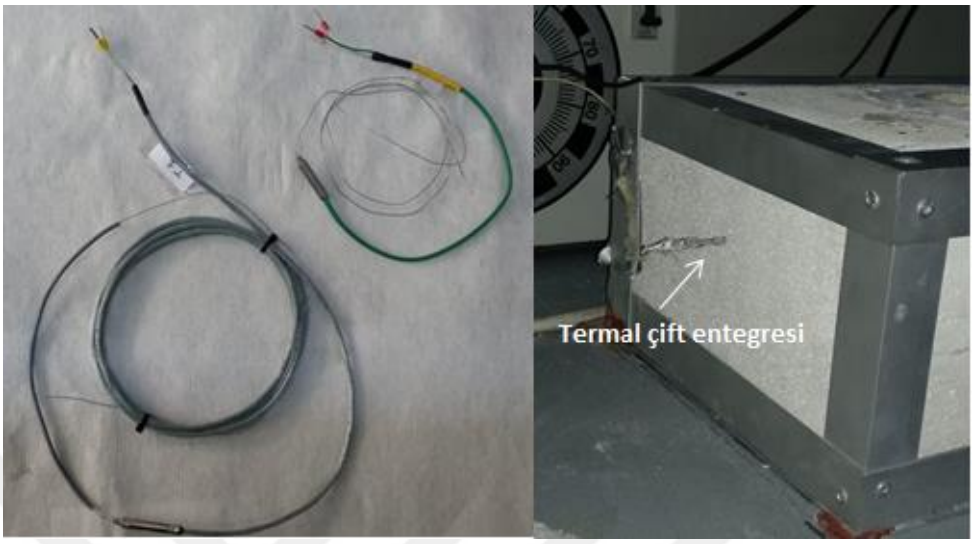
**Şekil 3.2** Direnç telleri, seramik boncuklar ve alümina tüp kullanılarak hazırlanan ısıtıcı bölge

Alumina tüpün alt ve üst kısmlarından 20mm boşluk bırakılacak şekilde sarım yapılarak 100mm sıcak bölge elde edilmiştir. Yapılan sarımın etrafı yüksek sıcaklıklara dayanıklı ateş kili çimentosu ile kaplanarak seramik boncuklarla birlikte direnç telleri alumina tüpe sabilenmiştir. Hazırlanmış olan bu ısıtıcı bölge metal iskelet içine alınmış ısı yalıtımı yüksek yutong taşı içerisine dikey olarak yerleştirilmiş ve yine ateş kili çimentosuyla sabitlenerek ısıtma fırını oluşturulmuştur (şekil 3.3).




**Şekil 3.3** Elektrik alan deneylerinde kullanılan ısıtıcı fırın, şematik gösterimi ve resmi

Dizayn edilen bu ısıtma fırınının sıcaklığın kontrol etmek amacıyla ısıtıcı bölgenin tam ortasına, sarım tellerinin üzerindeki yalıtım boncuklarının üzerine K tipi 0,5mm kalınlığında yüksek hassasiyetli yalıtılmış termal çift yerleştirilmiştir (şekil 3.4).



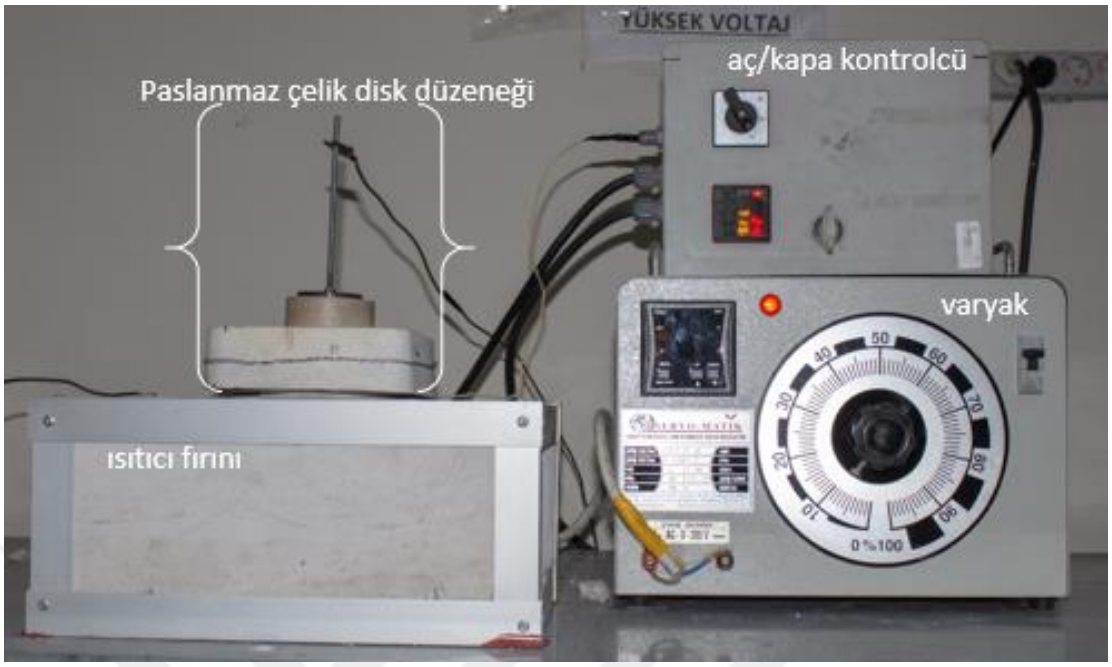

**Şekil 3.4** Deneylerde kullanılan termal çiftler ve ısıtıcı fırına entegresi

Bu termal çift fırın sıcaklığının ayarlandığı fırına kararlı ve sabit gücü sağlayan varyaka entegre edilmiş aç/kapa sıcaklık kontrolcüsüne bağlanmıştır. Kontrolcünün okuduğu sıcaklık ile fırın içi sıcaklığın eş zamanlılığını kontrol etmek ve fırın sıcaklığını stabilize etmek için dijital göstergeli seyyar bir sıcaklık okuyucuya (şekil 3.5) bağlı eş özellikli termal çift ile kontrolleri yapılmış ve fırın her deney için aynı sonucu verecek şekilde ($\pm 2^0$C) kurulumu tamamlanmıştır.




**Şekil 3.5** Fırın stabilizasyonunda kullanılan seyyar sıcaklık okuyucu

Isıtıcı fırın ve kontrol düzeneği şekil 3.6'da toplu olarak gösterilmiştir.




**Şekil 3.6** Isıtıcı fırın ve kontrol düzeneği

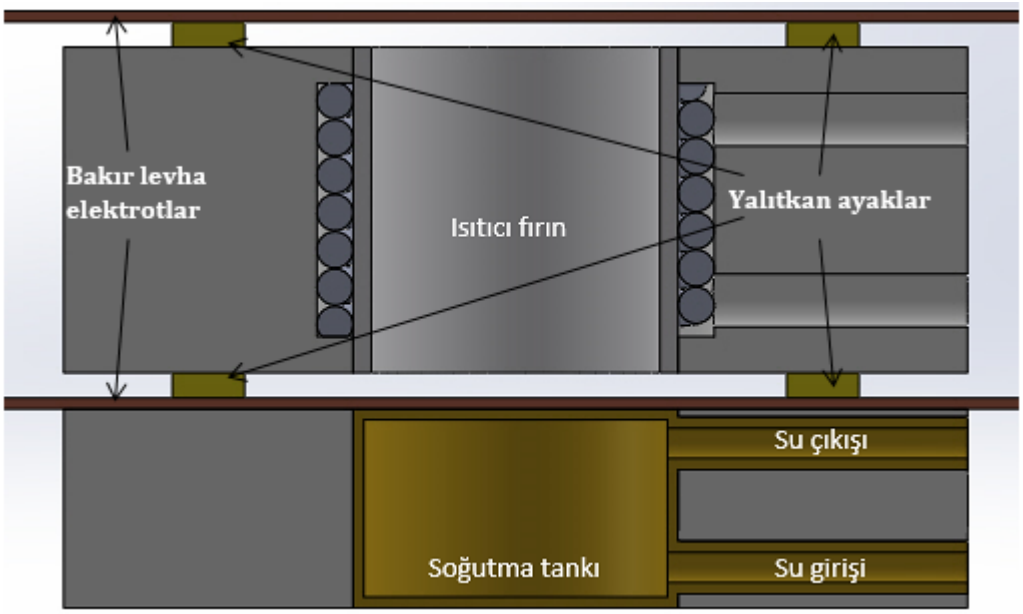
### 3.2.4 Silindirik Soğutma Sistemi

Sıvı alaşımların yüksek statik elektrik alan altında tek yönlü katılaştırılması için bir su soğutma sistemine ihtiyaç vardır. Bunun için ar-ge çalışmaları boyunca en stabil, en kullanışlı ve yüksek gerilimden kaynaklanabilecek olumsuzluklara karşı en güvenli soğutma aparatı ve sistemi dizayn edilerek kurulmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışmaların başında pirinç malzemeden imal edilmiş, zemine paralel su giriş çıkışına sahip kısmen yassı bir tank, ısıtcı fırının alt kısmına şekil 3.7'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.

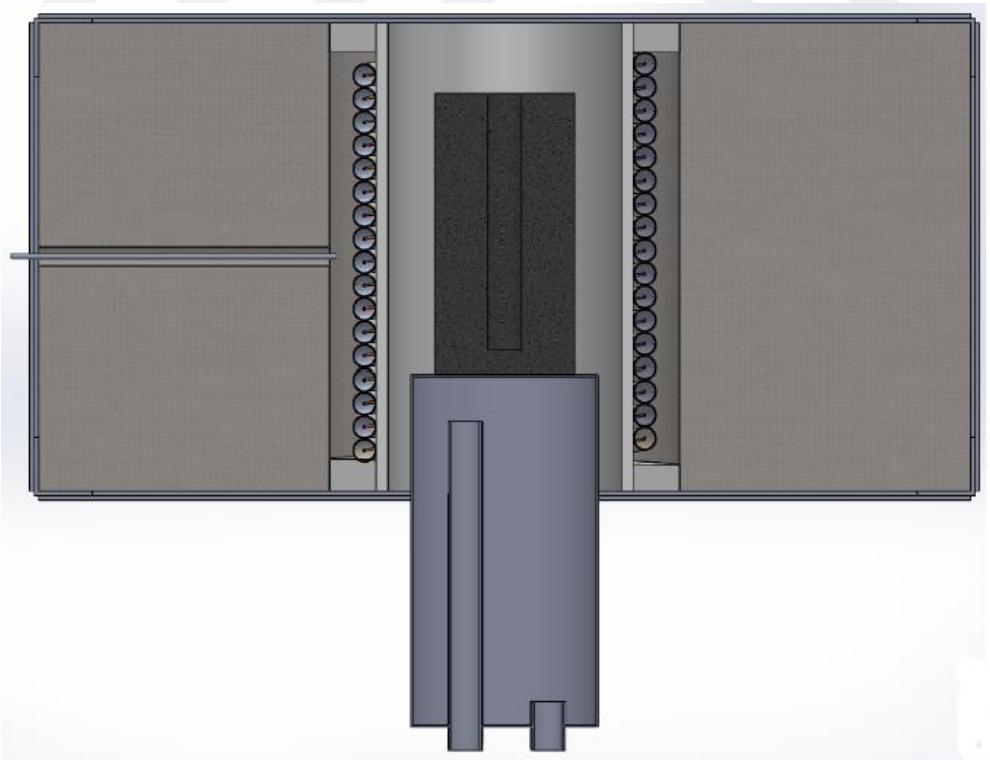
Yapılan ön çalışmlarda bu sistemin bir çok sorunlarıyla karşılaşılmıştır. Öncelikle soğutma tankının fırın dışında olması istenen etkili bir soğutma sağlayamamış ve doğrusal katılaştırmada problemler yaşanmıştır. Şekilde görülen su giriş ve çıkışının yanal olması yüksek gerilim problarının bağlanması sırasında güvenlik açısından da risk oluşturmuştur. Bunun yanında su giriş ve çıkışları ısıtıcı fırına çok yakın olmaları sebebiyle bağlantı hortumları aşırı ısınmadan dolayı deforme olmuştur.

Bütün bu dezavantajları ortadan kaldırmak için bir dizi beyin fırtınası yapılarak farklı dizaynlar düşünülmüş ve son olarak sıvı alaşımların yüksek statik elektrik

alan altında tek yönlü katılaştırılması için şekil 3.8'de gösterildiği gibi; ısıtıcı fırının bir miktar içine girecek şekilde, su soğutmalı, su giriş ve çıkışı alttan olan, silindirik paslanmaz çelik tank dizayn edilmiştir. Tankın fırın içindeki konumu şekil 3.8'de gösterilmiş ve detaylı anlatımı aşağıda açıklanmıştır.

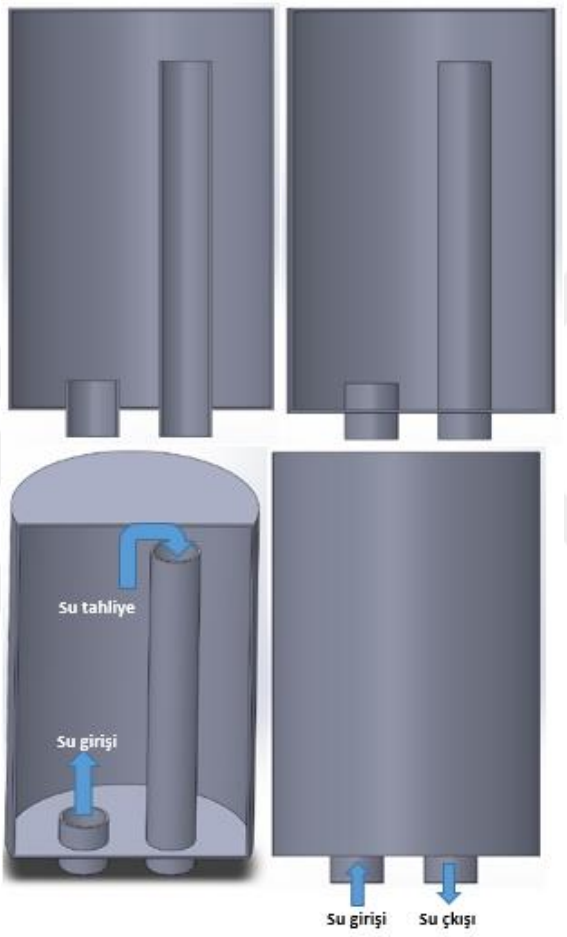



**Şekil 3.7** Ar-ge çalışmaları sırasında dizayn edilen soğtuma sisteminin ilk hali



**Şekil 3.8** Silindirik tankın fırın içindeki konumu

Sistem için özel ölçülerde tasarlanmış paslanmaz çelikten imal edilen bu silindirik tankın bir kısmı ısıtma fırının içine girmelidir. Bu yüzden öncelikle 38mm iç çap, 42mm dış çap ve 150mm uzunlukta geniş bir boru seçilmştir. Taban kısmı için 4mm kalınlığında paslanmaz çelik diske su girişi ve tahliyesini sağlayacak yaklaşık 4mm iç çapında kısa ve uzun iki ince boru(şekil 3.9) kaynakla sabitlenmiş ve bu disk de paslanmaz çelik boruya kaynaklanmıştır.




**Şekil 3.9** Sistemde kullanılan su soğutmalı silindirik tank

Yine borunun üst kısmına 4mm kalınlığında paslanmaz çelik disk kaynak edilerek silindirik soğutma tankı imal edilmiştir. Soğtmanın çok etkin olabilmesi için su giriş borusu olabildiğince kısa, su tahliye borusu tankın üst kapalı kısmına olabildiğince yakın(dolaşımı engellemeyecek şekilde üst diskle 2-3mm kadar mesafe bırakarak) olacak şekilde uzun seçilmiştir. Sızdırmazlığı kontrol etmek için tank bir su havuzunun içerisinde basınçlı hava verilerek kontrol edilmiştir. Bir kısmı fırının içinde kalacak olan bu tank aynı zamanda sistemde elektrik alanı oluşturacak

problardan birinin bağlanacağı bağlantı aparatı olarak da görev yapacaktır. Numune soğutma tankının üzerine yerleştirildiği için nununenin taban kısmının sıcak bolgeninin içerisinde kalması amacıyla soğutma tankın en az 20mm'lik bir kısmı ısıtma bölgesinde kalacak şekilde tank dikey olarak sisteme yerleştirilmiş ve yalıtkan ayaklarla sabitlenmiştir.

Tüm deneyler boyunca katılaştırmanın aynı şartlarda gerçekleşmesi için soğutma tankında dolaştırılacak suyun sıcaklığının sabit tutulması çok önemlidir. Çalışmaların başlarında şebeke suyu dolandırılması düşünülmüşse de yaz ve kış aylarında yapılacak deneylerde sabit bir su sıcaklığı sağlanamayacağı aşikardır. Bu yüzden bahsedilen hatayı elimine etmek için kapalı devre bir ısıtma/soğutma su dolaşım banyosu (sirkülatör) kullanılmış ve etkili elektrik alan etkisini gölgelemeyecek şekilde yavaş bir soğutma için de suyun sıcaklığı oda sıcaklığına yakın 18 $^{0}$C'lik bir sıcaklık seçilmiş ve sabit tutulmuştur.

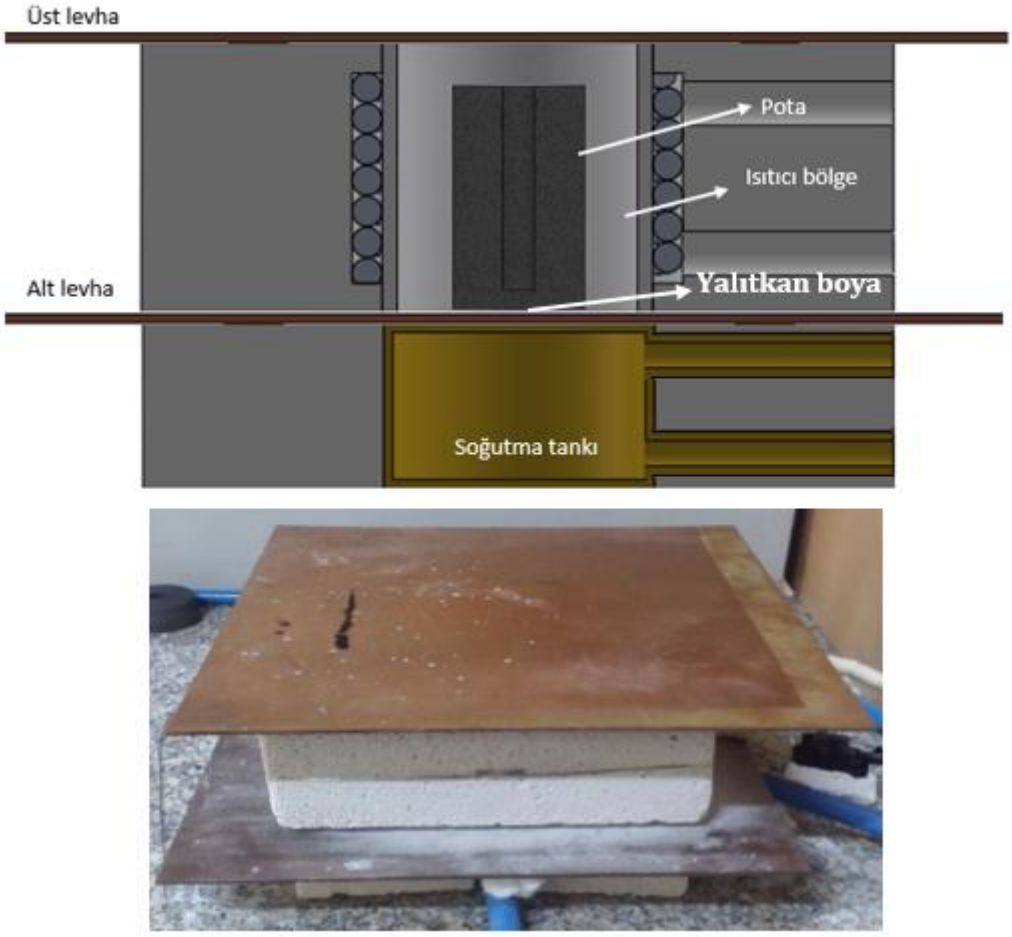
### 3.2.5 Yüksek Durgun Elektrik Alan Uygulama Sistemi

Deneysel sistemin en önemli ve yenilikçi kısmı olan elektrik alan uygulama sistemi bir çok ar-ge faaliyetlerinden geçerek son halini almıştır. Deneysel süreç öncelikle iki paralel levha arasındaki ergiyik atom ve moleküller üzerine elektrik alan oluşturma fikriyle başlamıştır. Bunun için düzgün elektrik alan sistemi; 350mm genişliğinde ve 350mm uzunluğunda ve 5mm kalınlığında düşey doğrultuda 100mm aralıkla yalıtkan destekler üzerine yerleştirilmiş iki bakır levha ve bu bakır levhalara uygulanması planlanan 1-6 kilovolt(kV) aralığında voltaj üreten DC güç kaynağından ibaret olarak tasarlanmıştır. Burada levhaların geniş ve büyük tutulması levhalar arası oluşacak elektrik alanın uniform olmasını sağlamak içindir. Bu doğrultuda yüksek iletkenliğe sahip saf bakır levhalar ve en yüksek 6kV ve 30miliamper çıkışa sahip DC güç kaynağı temin edilmiştir (şekil 3.10).



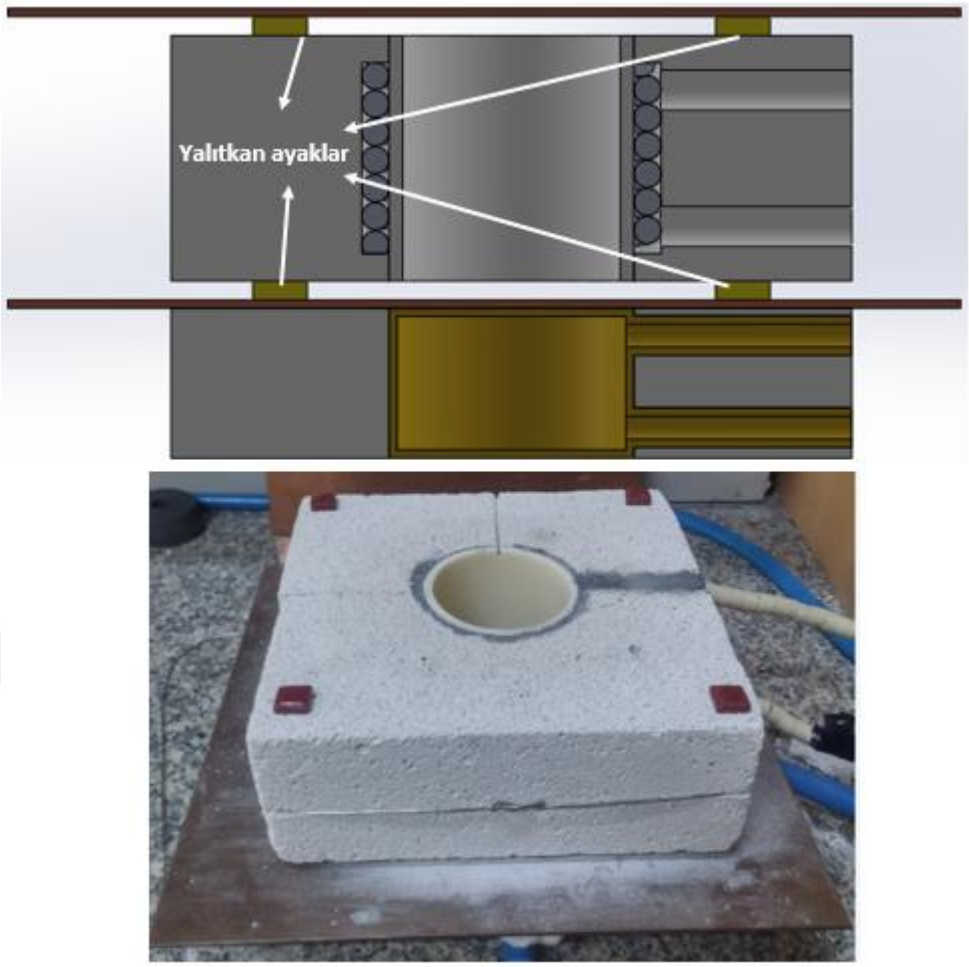

**Şekil 3.10** Deneysel çalışmanın başlarında kullanılan 6kV çıkışa sahip DC güç kaynağı

Isıtıcı fırın bu levhalar arasına yerleştirilmiş alt levha da soğutma tankı üzerine doğrudan oturtulmuştur. Numune potası da soğutma tankı merkezlenerek bakır levha üzerine oturtulur. Elektrik alan oluşturmak için DC cihazından çıkacak problar oluşturulacak elektrik alan yönüne göre bu paralel iki bakır levhaya bağlanır. Numuneye voltaj geçmemesi ve olası ark, elektropuls gibi etkilerden kaçınmak amacıyla numune ile alt bakır plaka arası elektriksel olarak yalıtkan seramik bazlı boya ile boyanarak ilk elektrik alan altında katılaştırma sistemi kurulmuştur (şekil 3.11).



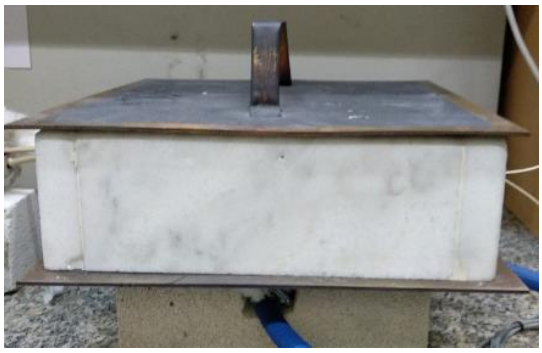

**Şekil 3.11** Ar-ge faaliyetleri sırasında kurulumu yapılan ilk elektrik alan sistemi

Bu sistemle yapılan deneylerde ciddi ark ve kısa devre problemleri yaşanmıştır. Bu durum ise çalışmanın ana amacı olan durgun elektrik alan etkisinin gözlenmesi prensibine ters düşmekle birlikte güvenlik önlemleri gereği herhangi bir ark ve kısa devre durumunda DC cihazının kendini kapatmasıyla sonuçlanmıştır. Bu yüzden hedeflenen voltaj değerleri uygulanamamıştır. Isıtıcı tellerden ve ısıtıcı bölgeyi taşıyan düşük kalitedeki alumina tüp ve yalıtkan tuğladan atladığı düşünülen yüksek gerilim problemini çözmek için öncelikle ısıtıcı bölgedeki ısıtıcı tellerin mesafesinin ne olması gerektiği üzerine kafa yorulmuştur. Denemeler sonucu sarım tellerinin herhangi bir voltaj taşıyan aparattan 20mm uzakta olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu ısıtıcı teller revize edilip levhalar ve ısıtıcı bölge arasına da yalıtkan cam ayaklar konarak yeni bir dizayna gidilmiştir (şekil 3.12).



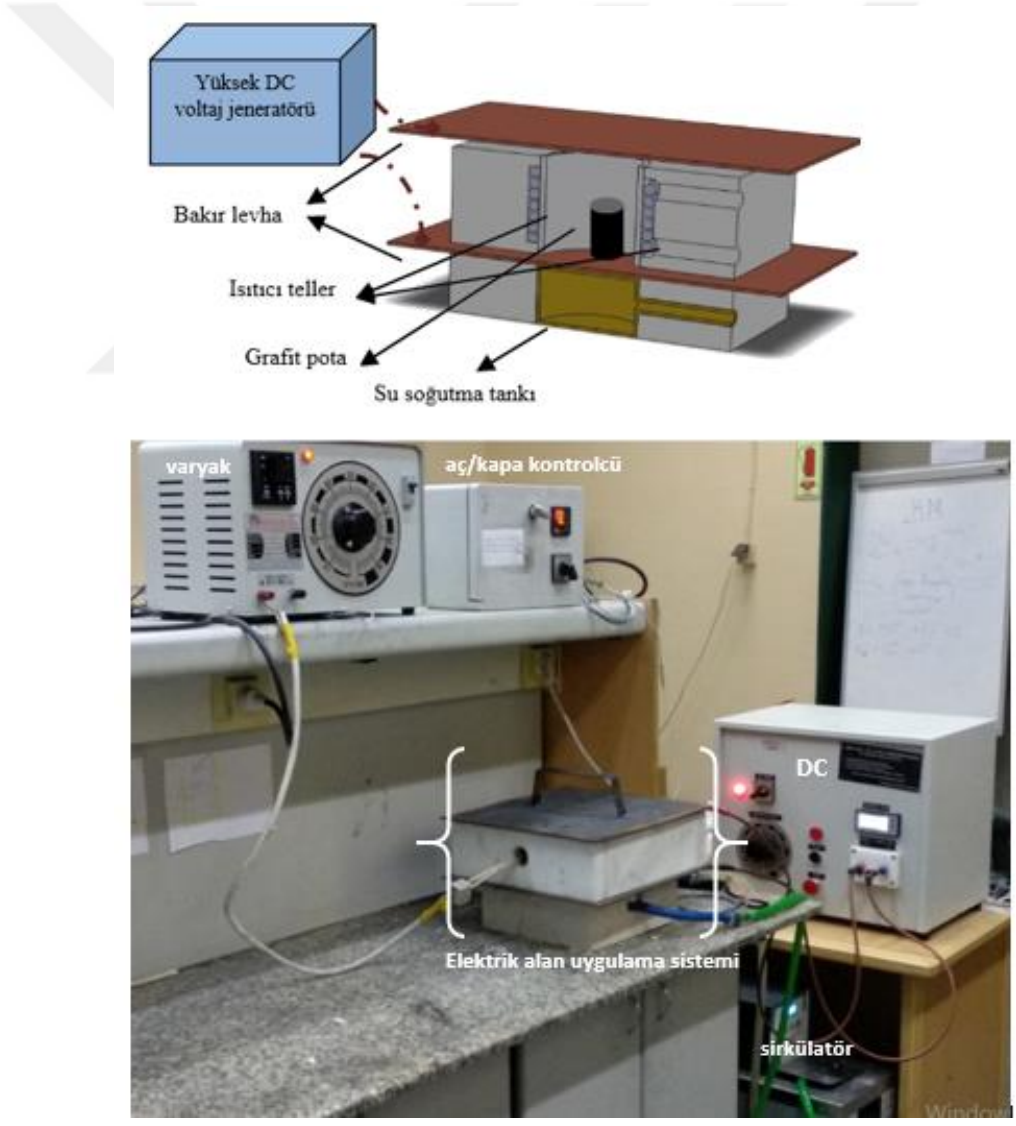

**Şekil 3.12** Ar-ge faaliyetleri sırasında kurulumu yapılan bir diğer elektrik alan sistemi

Bu şekilde ark problemi kısmen giderilmiş olsa da deneyler sırasında yüksek voltajlara çıkıldığında ark problemi tekrar görülmüştür. Bu problemi gidermek ve sistemi daha stabil hale getirmek için bakır levhalar arasına 300mm uzunluğunda 20mm kalınlığında mermer bloklardan çerçeve yaptırılmış ve ısıtıcı bölge daha kaliteli malzemelerle revize edilip bu mermer çerçevenin içine alınmıştır (şekil 3.13).



**Şekil 3.13** Ar-ge faaliyetleri sırasında kurulumu yapılan mermer çerçeveli bir diğer elektrik alan sistemi

Ar-ge süreci içerisinde kullanımına karar verilen bir sistemin son halinin şematik çizimi ve görseli şekil 3.14'de gösterilmiştir.



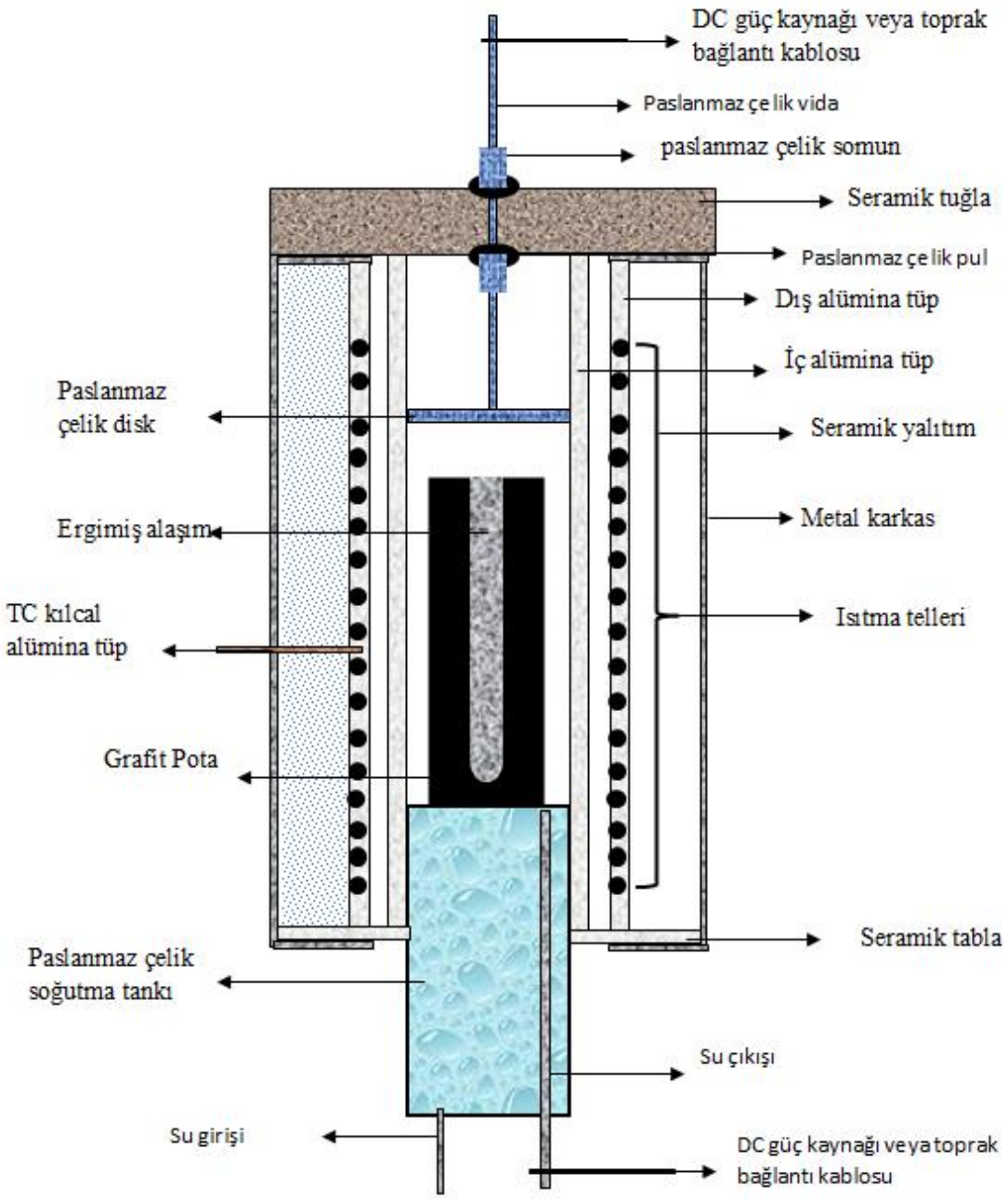

**Şekil 3.14** Ar-ge süreci içerisinde kullanımına karar verilen bir sistemin son hali

Bu sistemle uygulanan bir kaç seri deneyde elektrik alanın alaşımların mikroyapı ve sertlikler üzerine etkisi gözlenmiş ancak çok sınırlı kaldığı görülmüştür. Öyle ki yapılan incelemelerde mikroyapı parametrelerindeki değişim %10-12, sertlik değerlerindeki değşimse %5-7 aralığında kaldığı gözlenmiştir. Bu değişim ise deneysel ve istatiksel hata oranlarının biraz üzerinde olup sonuçlar tatmin etmemiştir. Bu sistemle yapılan deneysel çalışmalara bakıldığında; şekil 3.11'de gösterildiği gibi numune, elektrotlardan yalıtkan seramik boya kullanılarak yalıtılmış olup elektrotlar (üst ve alt bakır levha) arasında oluşan düzgün elektrik alan içerisinde kalacak şekilde yerlerştirilmiştir. Çalışmalarda elektrotlar yani levhalar arasına yerleştirilen numunenin boyu minimum 48mm olarak alınmıştır. Yani elektrotlar arası mesafe en az > 48mm'dir. Kullanılan DC güç kaynağının kapasitesi ise en yüksek 6000V olup mevcut şatlarda uygulanabilen elektrik alan değeri 1.25kV/cm olmuştur. Bu alan değeri ise alanın büyüklüğünün etkisinin sınırlı aralıkta gözlememize neden olmuştur.

Bu durum elektrik alan mesafesinin ayarlanabileceği, numunenin etkinin artırılması amacıyla güvenli bir şekilde elektrot olarak kullanılabildiği ve daha yüksek kapasiteli DC güç kaynağıyla yeni bir sistem kurmayı zorunlu hale getirmiştir. Bu doğrultuda yukarıda sayılan eksiklikleri giderecek şekilde aşağıda detaylı anlatımı yapılan yeni sistem geliştirilmiş ve hassas bir şekilde kurulumu yapılmıştır.

Yeni statik elektrik alan sistemi, düşük akımlı ve yüksek gerilimli DC güç kaynağı cihazı ile bu cihazdan çıkan ± probların bağlandığı disk, ergiyik numunenin oturduğu tank ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Amaç doğrusal katılaştırılacak numune üzerinde katılaştırma sırasında düzgün doğrusal elektrik alan oluşturabilmektir. Elektrik alan etkisinin katılaştırma sırasında net bir şekilde gözlenmesi için elektrik alan, katılaştırma doğrultusunda uygulanmıştır. Numune ve numuneye elektrik alan oluşturacak mekanizmaya odaklanmış şematik çizim şekil 3.15'da verilmiştir.

Statik yüksek elektrik alan oluşturmak için FUG HCP 1400-35000 tipi DC yüksek gerilim kaynğı cihazı özel olarak ürettirilmiştir (şekil 3.16).




**Şekil 3.15** Statik elektrik alanı altında yönlü katılaşma için deneysel kurulum

Çok düşük akım ve yüksek voltaj sağlayan bu cihaz ayarlanabilir en yüksek 40 miliamper ve 35000 Volt çıkış sağlayabilmektedir. Cihazdan iki adet çıkış probu alınmaktadır. Problardan biri yüksek pozitif gerilim sağlarken diğeri nötr çıkışıdır. Bu problar uygulanacak elektrik alan yönü (Katılaşma yönü,+y. Katılaşma yönüne ters,-y) belirlendiğinde buna göre problar ya numunenin oturduğu soğutma tankına ya da üst mekanizmadaki disk için sonsuz vidaya bağlanmaktadır. Almanyanın FUG firmasına özel olarak ürettirilen doğru akım (DC) sağlayan bu güç kaynağı en az 0-

35kV aralığında ayarlanabilir çıkış voltjına ve en az 0-40mA aralığında ayarlanabilir akım çıkışına sahiptir. Şehir şebekesiyle çalışmaya uygun olarak üretilen cihaz en az 1400W güç üretmektedir. Akım ve gerilim için ayrı ayrı ayarlanabilir hassas ölçekli 10 turlu potansiyometre ile ayar düğmesine sahiptir. Bunların yanında cihaz güç sınırlaması (power limitation), düşük dalgalanma (lower ripple), düşük enerji depolama (lower stored energy) ve kutup seçici (polarity reversal) anahtarı gibi son teknoloji özelliklere sahiptir. Ayrıca cihaz kısa devre ve ark koruma özelliği, voltaj limit özelliği ve izoleli kasası ile güvenlik önlemleri de düşünülerek ürettirilmiş bir cihazdır. Cihaz %0,3 hassasiytte, $4^1/_2$ dijitli volt ve amper çıkış değerlerinin okunabildiği ekranlara sahiptir.



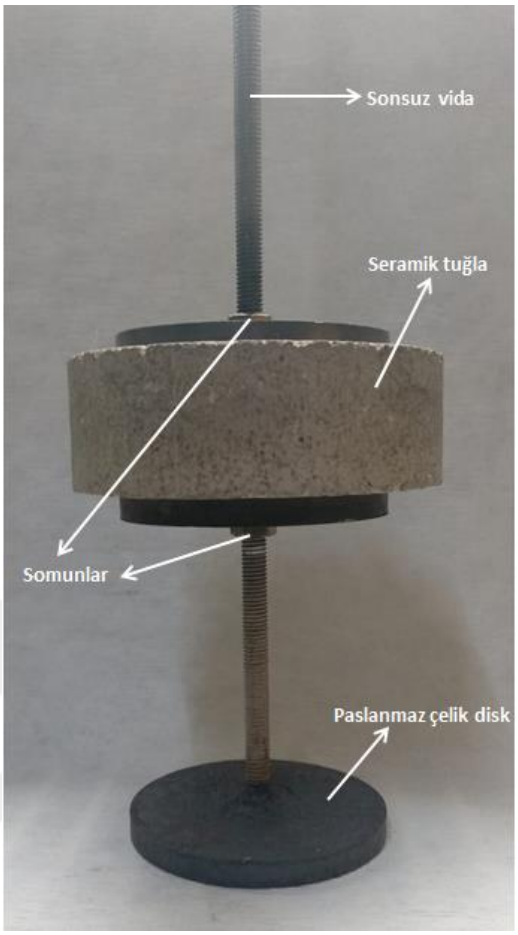

**Şekil 3.16** Özel üretim DC yüksek gerilim kaynağı

Uygulanan statik elektrik alanın büyüklüğü eşitlik (3.1)'e göre hassas bir şekilde belirlenmeli ve hassas bir şekilde ölçülebilmelidir.

$$E = \frac{V}{d} \tag{3.1}$$

Bu yüzden numune üzerinde belirli bir mesafe oluşturmak için hassas bir düzenek hazırlanmıştır (şekil 3.17). Düzenek için öncelikle 4mm kalınlığa ve numunenin tamamı üzerinde düzgün elektik alan oluşturması için numune kalıbı çapından büyük 49mm çapa sahip paslanmaz çelik diskin ortasına 4mm çapında sonsuz vida kaynaklanmıştır. Mesafe kontrolü sırasında paslanmaz çelik diskin numune üzerinde boşluk oluşturacak şekilde askıda kalması için fırın ağzına oturacak bir silindirik seramik tuğla(22.5mm kalınlığa ve 67mm çapa sahip) disk merkeziyle

merkezlenerek somunlar yardımıyla sonsuz vidaya tutturulmuştur (şekil 3.17).

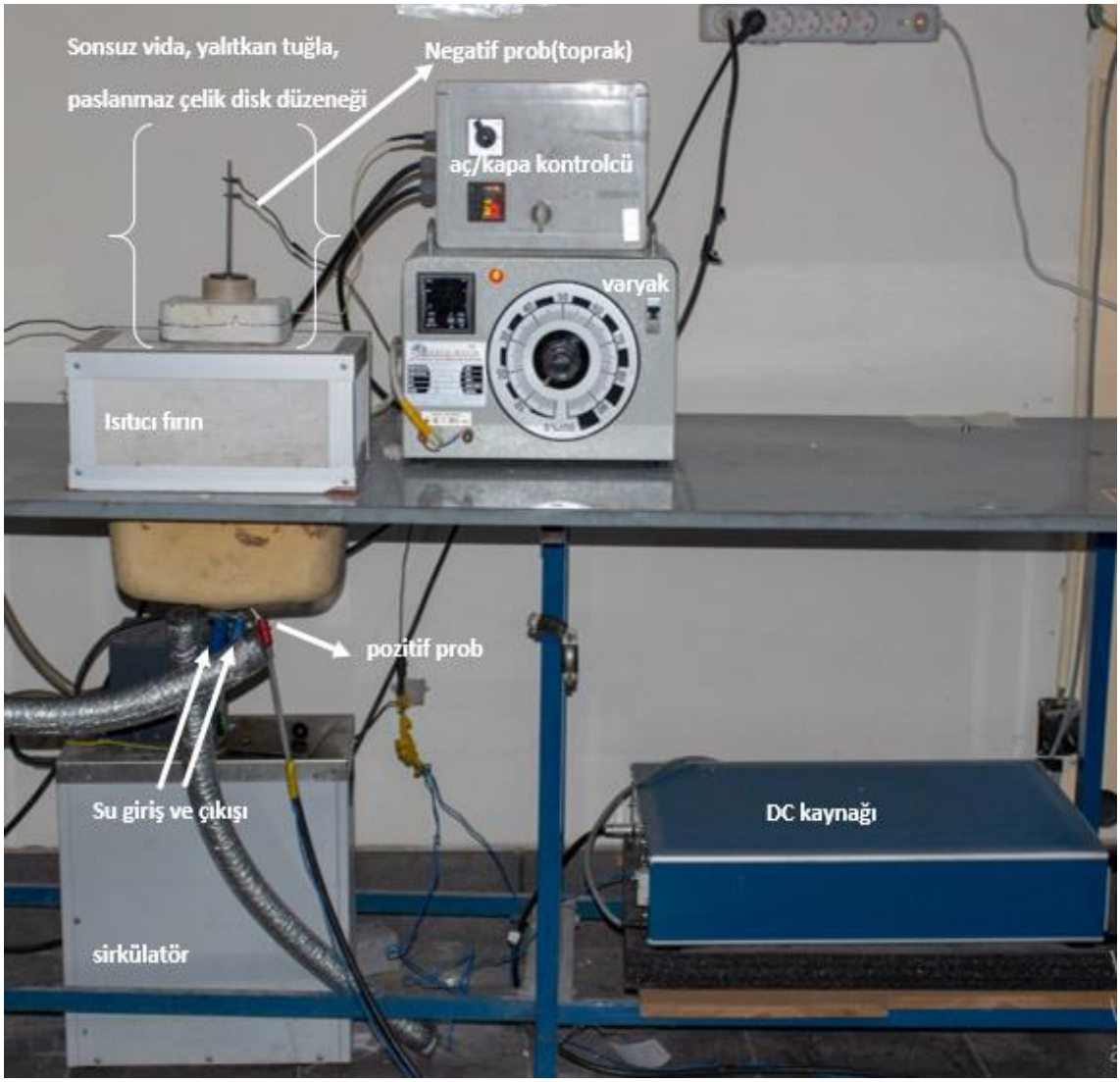



**Şekil 3.17** Elektrik alan mesafesini ayarlamada kullanılan düzenek

Mesafenin ayarlanması ve belirlenmesi ise şu şekilde yapılmıştır, somun ve vida sistemi yardımıyla öncelikle paslanmaz çelik disk numune kalıbının üst noktasına temas edinceye kadar indirilmştir. Tam temas sağladığı noktada disk tutucu sistemin fotoğrafı çekilmiştir. Belirlenen mesafe miktarı disk yukarıya hareket ettirilerek tekrar fotoğrafı çekilmiştir. Bu iki fotoğraf yardımıyla paslanmaz çelik disk ile numune kalıbının üst kısmı arasındaki boşluk mesafesi belirlenmiştir. Mesafe 0,5 mm hassasiyetle belirlenmiştir.

Somun ve vida sistemi yardımıyla paslanmaz çelik diskin numune üzerinde pozitif elektrik alan($E_+$) oluşturmak için cihazdan yüksek gerilim taşıyan pozitif çıkış probu doğrudan numuneyle teması bulunan soğutma tankına bağlanır. Elektrik alan oluşumunu tamamlamak için diğer prob ise üst mekanizmadaki sonsuz vidaya

bağlanır. Negatif elektrik alan($E_-$) oluşturmak için ise cihazdan yüksek gerilim taşıyan pozitif çıkış probu üst düzeneğe yani numune üzerine elektrik alan kuvvetini oluşturacak olan paslanmaz çelik ile bağlantılı sonsuz vidaya bağlanır. Diğer prob ise numuneyle bağlantılı soğutma tankına bağlanır. Deneysel sistemin son hali şekil 3.18'de gösterilmektedir.




**Şekil 3.18** Farklı yön ve büyüklüklerde elektrik alan atında yapılan katılaştırma deney düzeneği

## 3.3 Deneysel Süreç

Alaşımların katılaştırılması sırasında uygulanacak elektrik alanın alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelenemsi amacıyla mikroyapıları çok iyi bilinen ötektik Al-%33Cu(Ağ) (lamelsel mikroyapı) ve ötektik Al-%6,4Ni(Ağ)

(çubuksal mikroyapı) alaşımları seçilmiştir. Bu alaşımlar hassas bir bileşimle aynı şartlarda hazırlandıktan sonra farklı elektrik alan büyüklüklerinde ve farklı yönlerde elektrik alan altında doğrusal olarak katılaştırılmışlardır. Her bir bileşim için kontrol numunesi olarak aynı şartlarda ve aynı düzenek içerisinde elektrik alansız numunler de hazırlanmıştır.

Herhangi bir deneysel hataya sebebiyet vermemek ve hem elektrik alan altında yapılan hem elektrik alansız yapılan tüm deneylerin aynı şartlarda yapılması için alaşımların bileşimi, ısıtma fırının ön sıcaklığı, sıvı alaşımların sıcaklığı ve soğutma suyunun sıcaklığı tüm deneyler için tanımlanmış ve sabit tutulmuştur. Boyutsal olarak da bir hata gelmemesi adına tüm deneylerde belirlenen özdeş grafit potalar kullanılmıştır.

Numunler elektrik alan altında katılaştırıldıktan sonra mikroyapı analizleri yapılmış, ötektik mesafeler ve tane boyutları ölçülmüştür. Elektrik alanın mekanik özelliklere etkisini incelmek için HB sertlik testleri ve çekme dayanımı testleri uygulanmıştır.

Özetle farklı yön ve büyüklükte yüksek durgun elektrik alan altında katılaştırma deneyleri; numunelerin hazırlanması, hazırlanan numunelerin elektrik alan altında katılaştırılması, metalografik hazırlık, mikroyapı parametreleri (ötektik mesafe, $\lambda$ ve ötektik tane boyutu, ÖTB.) incelemesi ve mekanik testler (Brinell sertlik, çekme dayanımı) uygulaması adımlarından oluşmaktadır. Bu adımların her biri ayrı başlıklar altında aşağıda izah edilmiştir.

### 3.3.1 Numunelerin Hazırlanması

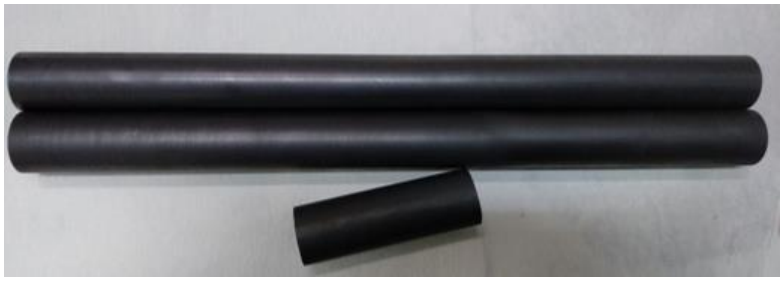
#### 3.3.1.1 Numune Potalarının Hazırlanması

Deneysel çalışmalar sırasında iki farklı pota kullanılmıştır. Bu kulanılan potalar, kolay işlenilebilirliği, yüksek sıcalığa dayanımları, iyi ısıl iletkinlikleri ve metalik alaşımlarla reaksiyona girmemesi gibi özellikleri sebebiyle grafit malzemeden imal edilmişlerdir. Bunun için yüksek yoğunluklu, korozyon dayanımı yüksek ve $1400^0$C kullanım sıcaklığına sahip Morgan marka grafitler kullanılmıştır. Kullanılan özel grafitlerin fiziksel özellikleri tablo 3.1'de verilmiştir.

**Tablo 3.1** Kullanılan morgan marka garafitlerin bazı fiziksel özellikleri

| Özellikler | Birim | | Değerler |
|---|---|---|---|
| Görünür yoğunluk | $g/cm^3$ | min | 1,85 |
| Tane boyutu | μm | max | 10 |
| Özgül elektrik direnci | μΩm | max | 11 |
| Bükülme mukavemeti | MPa | min | 50 |
| Basınç dayanımı | MPa | min | 105 |
| Kül içeriği | % | max | 0,02 |
| Isıl iletkenlik | W/mK | | 116 |
| Açık porozite | % | | 10 |
| Termal genleşme kats. | $10^{-6}/K$ | | 5,2 |

- **Alaşım hazırlamada kullanılan grafit potalar:** Her deneyde aynı kütleden kesilmiş homojen bileşim ve yapıya sahip alaşımların kullanılması çok önemlidir. Bu yüzden alaşımların hazırlanacağı pota en az bir parti deneye yetecek kapasitede kütlenin hazırlanabilceği ölçülerde olmalıdır. Bunun için öncelikle fiziksel özellikleri belirtilmiş 40mm çapında 500mm uzunluğunda morgan marka grafit çubuklar temin edilmiştir (şekil 3.19).



**Şekil 3.19** Alaşım hazırlamada ve elektrik alan deneylerinde kullanılan potaların işlendiği grafit çubuklar

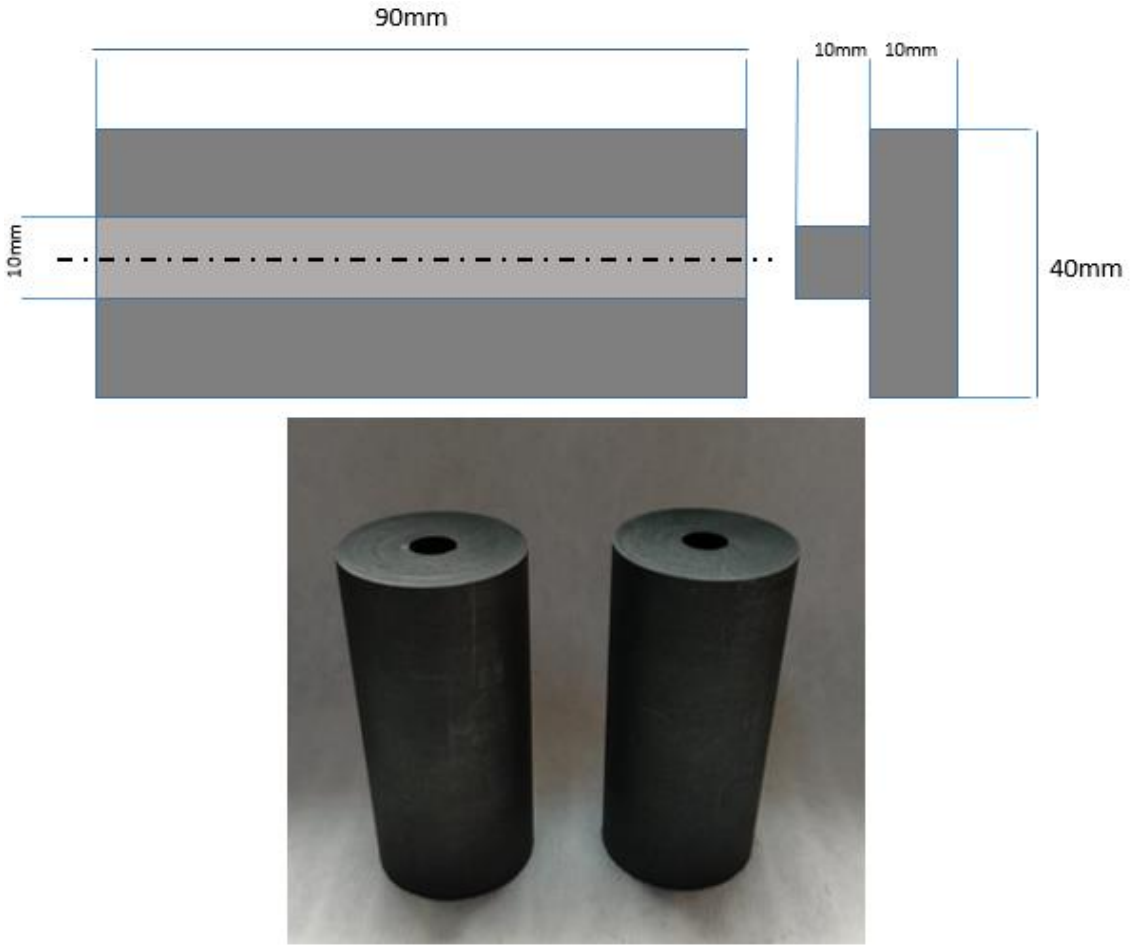
Bu çubuklar 40mm dış çap, 30mm iç çap 160mm boy ve 140mm derinlikte, alaşımların hazırlanacağı fırına uyumlu ebatlarda ve kolay karıştırılabilecek hacimde potalar torna yardımıyla işlenmiştir. Eriyik alaşım hazırlamda kullanılan derin potalar şekil 3.20'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.20** Sıvı alaşımların hazırlanmasında kullanılan grafit pota

- **Elektrik alan altında katılaştırma deneylerinde kullanılan özdeş potalar:** Elektrik alan altında katılaştırma deneylerinde uygulanan elektrik alanın hesaplanması için mesafenin çok iyi belirlenmesi grerkir (E=V/d). Uygulanacak elektrik alanda pota üst yüzeyi ile paslanmaz çelik diskin arasındaki mesafe tüm deneyler için aynı olmalıdır. Bu yüzden boyutsal kaynaklı deneysel bir hata oluşmaması için elektrik alan altında yapılacak tüm deneylerde kullanılan grafit potaların özdeş olması çok önemlidir.

Bunun için şekil 3.19 de gösterilen morgan marka grafit çubuklardan 40mm dış çap, 10mm iç çap, toplamda 80mm derinlik ve 100mm uzunlukta özdeş garafit potalar torna yardımıyla işlenmiştir. Katılaşma sonrası numuneyi kolay çıkarmak ve numune kalıbını tekrar kullanmak için bu özdeş potalar ana parça ve alt tıpa olmak üzere iki parçalı üretilmiştir. Elde edilen özdeş grafit potaların ölçülü şematik çizimi ve resmi şekil 3.21'de gösterilmektedir.



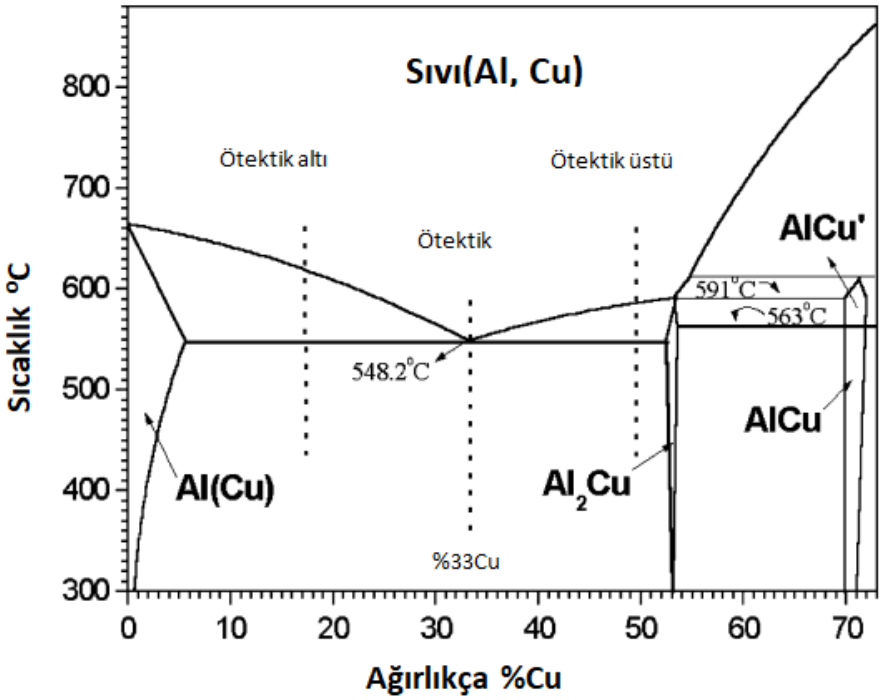

**Şekil 3.21** Ergiyik alaşımların elektrik alan altında katılaştırılmasında kullanılan özdeş potaların şematik çizimi ve resmi

Her bir işleme kademesinde ve en son pota ve tıpaların ölçüleri hassas kumpas yardımıyla teyid edilmiştir.

### 3.3.1.2 Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni Ötektik Alaşımların Hazırlanması

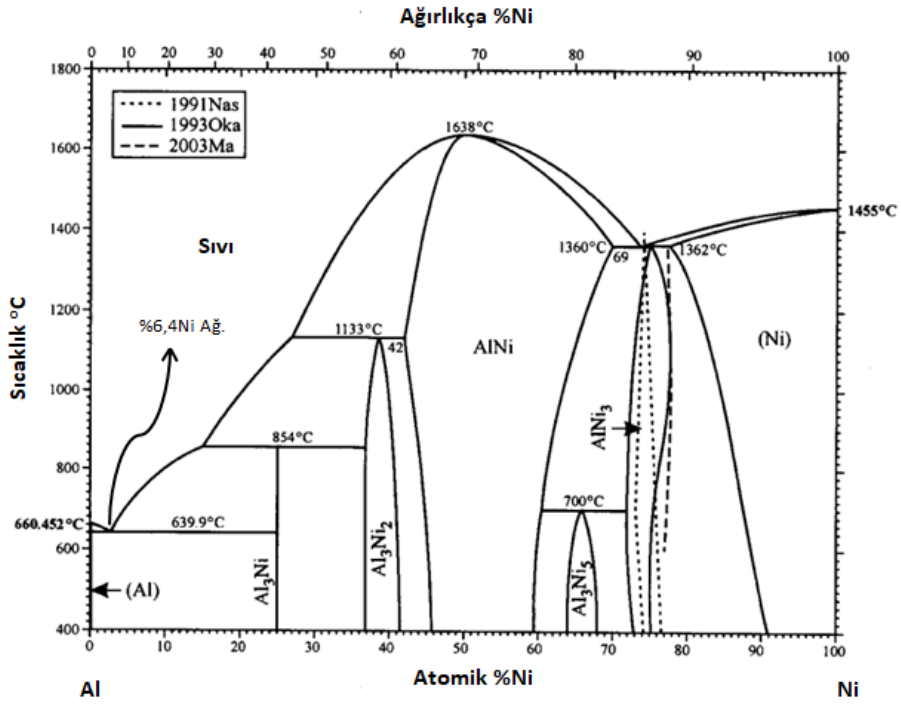
Alaşımlar, yapılacak olan döküm sayısına göre miktarları belirlenerek ilgili faz diyagramlarından(şekil 3.22 ve şekil 3.23) Al-Cu ötektik alaşımı için ağırlıkça %33 Cu ve %67 Al, Al-Ni ötektik alaşımı için ise ağırlıkça %6,4 Ni ve %93,6 Al bileşimleri hesaplanmış hassas teraziyle tartılarak ölçülmüştür. Kullanılan tüm alaşım elementleri Alfa Easer firmasından tedarik edilen %99,99 saflıktaki metallerdir.

Alaşımlar hazırlanırken metallerin açık atmosferde oksitlenmemesi ve sorunsuz bir şekilde hazırlanması için alaşım hazırlama işlemi vakum atmosferinde, üst bölümlerde tanıtılan ve şekil 3.1'de gösterilen vakum atmosfer fırınında gerçekleştirilmiştir.




**Şekil 3.22** Örnek Al-Cu faz diyagramı [89]

Fırın sıcaklığı 850 °C'ye geldiğinde şekil 3.20 de görülen alaşım hazırlama potasına (40mm dış çap, 30mm iç çap 160mm boy ve 140mm derinlikte) önceden belirlenmiş miktarda Al konur ve fırının içinde ergimeye bırakılır.




**Şekil 3.23** Örnek Al-Ni faz diyagramı [90]

Yaklaşık 25dk sonra belirlenen miktardaki alaşım elementleri (Al-Cu sistemi için Cu bilyeler ve Al-Ni sistemi için Ni garnüller) potaya ilave edilerek ergiyik Al'nin içine gömülmesi sağlanır. Bu dakikadan sonra alaşımların homojenleşmesi ve varsa ergiyik içinde gazların giderilmesi için eriyik her 20 dakikada bir ince bir alumina çubukla (1,2mm iç çap, 2mm dış çap ve 200mm uzunluk) en az 3 kez karıştırılır. Bu işlemlerden sonra alaşım katılaşmaya bırakılır. Katılaşan alaşım ters çevrilir ve aynı karıştırma prosedürü uygulanarak 2. kez ergitilip katılaştırılır.

Hazırlanan alaşımların bilşimleri Hilger Analiytical marka optik emisyon spektrometresi ve karakteristik mikroyapı analizlerinden teyit edilmiştir.

### 3.3.2 Alaşımların Yüksek Durgun Elektrik Alan Altında Katılaştırlması

Ötektik bileşimde hazırlanan alaşımlar elektrik alan uygulama fırınında kullanılacak olan özdeş potaların iç hacmine göre kesilerek bu potalar içinde vakumlu ergitme fırınında ergitilirek hazırlanır. Vakumlu erğitme fırında ergime gerçekleştikten sonra homojenleştirme ve olası gaz boşluklarını gidermek için ergiyik 20 dakika aralıklarla en az 3 kez bir ucu kapalı alumina çubuklara (1,2mm iç çap, 2mm dış çap ve 200mm uzunluk) tel geçirilerek karıştırılır.

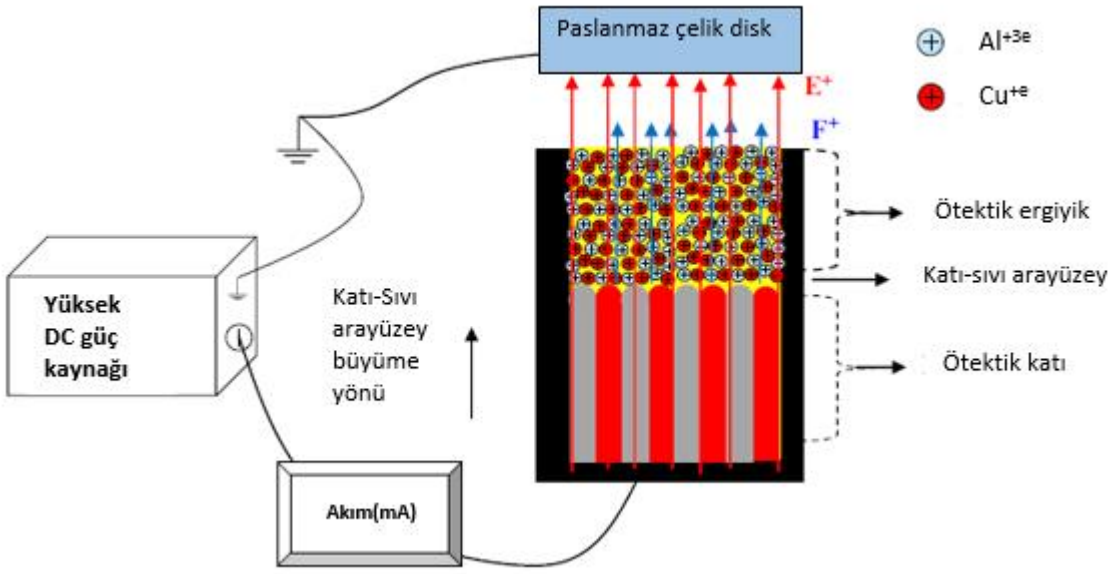
Bu sırada elektrik alan altında katılaştırma sistemindeki ısıtma fırını ergiyiğin hemen katılaşmaması ve elektrik alan düzeneği tam olarak çalıştırılana kadar numuneleri ergiyik halde tutması için alaşımların ötektik erime sıcaklığının üzerinde (Al-Cu için 580 $^{o}$C, Al-Ni için 670 $^{o}$C) bir sıcaklığa ön ısıtılır.

Eş zamanlı olarak soğutma sisteminde dolanacak olan suyun da istenilen sabit sıcaklığa gelmesi için su dolaşım banyosu çalıştırılır. Elektrik alan uygulaması başlamadan önce suyun silindirik soğutma tankına gitmeden kendi içerisinde sirküle olarak istenilen sıcaklığa gelmesini sağlamak için vana ve bağlantı aparatları yardımıyla suyun akışını tekrar cihaza veren düzenek kurulmuştur. Sistem hazır hale geldiğnde tanka giden vana açılarak elektrik alan uygulama sisteminden suyun dolaşımı sağlanır.

Yeterli homojenizasyon sağlandıktan, ısıtma fırının sıcaklığı istenilen değere geldikten ve sistemde dolaşacak olan soğutma suyunun sıcaklığı belirlenen değere geldikten sonra vakumlu ergitme fırınından alaşım dolu pota alınır ve hiç zaman

kaybetmeden sistemdeki ısıtma fırının içerisine, soğutma tankının üstüne yerleştirilir. Elektrik alan uygulayacak üst mekanizma (paslanmaz çelik disk, seramik tuğla, sonsuz vida) simetrik ve pota ile tam uyumlu olacak şekilde fırının üzerine yerleştirilir. Potanın üst kısmı ile paslanmaz çelik disk arasındaki mesafe tekrar kontrol edilir.

Bu aşamadan sonra elekrik alan yönüne karar verilir. Eğer pozitif elektrik alan uygulanacaksa ($E_+$; numune pozitif, paslanmaz çelik disk negatif kutup) DC cihazından çıkan pozitif yüksek voltaj taşıyan prob silindirik soğutma tankına dolayısıyla doğrudan numuneye bağlanır. Diğer negatif prob ise sonsuz vidaya dolayısıyla numune üzerinde düzgün elektrik alan oluşuracak paslanmaz çelik diske bağlanır(şekil 3.24).



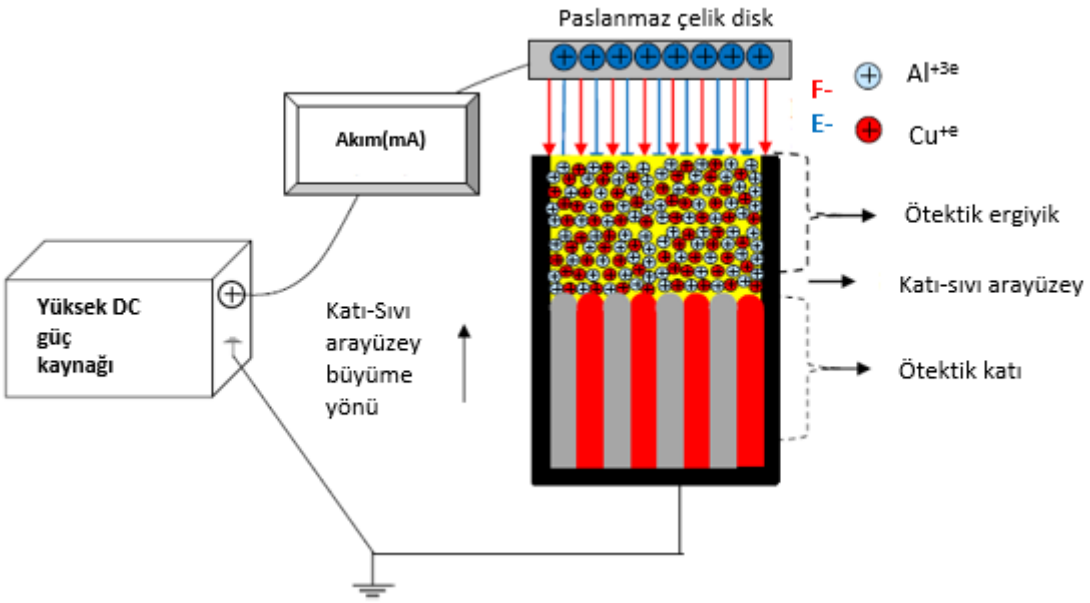

**Şekil 3.24** Pozitif durgun elektrik alan uygulamasıyla sıvı atom ve moleküllerin yüklenmesi ve atomik kütle transferini anlatan şematik gösterim

Bu durumda numune üzerinde katılaşma yönünde yani +y yönünde bir elektrik alan oluşur. Pozitif elektrik alan uygulamaları Al-Cu alaşımı için 8,1kV/cm, 8,8kV/cm ve 10kV/cm büyüklüklerinde, Al-Ni alaşımı için 8kV/cm, 9kV/cm, ve 10kV/cm büyüklüklerinde uygulanmıştır.

Pozitif elektrik alan altında katılaştırma deneyinde etkin mekanizma şöyle açıklanabilir: Sıvı atomlar uygulanan pozitif yüksek gerilimle pozitif olarak yüklenir.

Uygulanan durgun elektrik alandan kaynaklı pozitif olarak yüklenmiş bu sıvı atomlara alan yönüyle aynı yönde olacak şekilde bir elektrik kuvveti ($F_+$) etkiyecektir. Etkiyen bu kuvvet sıvı fazdan katı faza geçen atomları yavaşlatacak ve geçiş sayısını azaltacaktır, yani şekil 3.24'de gösterildiği gibi sıvı fazdan katı faza kütle aktarım hızını (mass transfer) azaltır. Bu yavaşlatmanın katılaştırılan alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisi gelecek bölümde incelenecektir.

Eğer negatif elektrik alan uygulanacaksa ($E_-$; numune negatif-paslanmaz çelik disk pozitif kutup) DC cihazından çıkan pozitif yüksek voltaj taşıyan prob sonsuz vida yardımıyla paslanmaz çelik diske, diğer negatif prob ise numune için silindirik soğutma tankına bağlanır(şekil 3.25).




**Şekil 3.25** Negatif durgun elektrik alan uygulamasıyla sıvı atom ve moleküllerin yüklenmesi ve atomik kütle transferini anlatan şematik gösterim

Böylece numune üzerinde katılaşmanın büyüdüğü yöne ters yönde (–y yönünde), bir elektrik alan uygulanmış olur. Negatif elektrik alan uygulamaları Al-Cu alaşımları için 7,8kV/cm, 8,8kV/cm ve 10,2kV/cm büyüklüklerinde, Al-Ni alaşımları için ise 8kV/cm, 9kV/cm ve 10kV/cm büyüklüklerinde uygulanmıştır.

Negatif elektrik alan altında katılaştırma deneyinde etkin mekanizma ise şöyle açıklanabilir, negatif elektrik alan durumunda sistemin kurulumu gereği ergiyik alaşım toprağa bağlanır ve böylece sıvı alaşım atomları en yüksek enerji düzeyindeki

elektron veya elektronları kaybederek pozitif yüklü iyonlar haline geçerler (Örneğin: $Al^{+3}$ ve $Cu^{+}$). Bu kez paslanmaz çelik disk üzerinden uygulanan durgun elektrik alanından dolayı pozitif olarak yüklenmiş sıvı atomlara alan yönüyle aynı yönde (bu kez katı-sıvı arayüzeyin büyüme yönüne ters) bir elektrik alan kuvveti (F_) etki eder. Bu durum sıvı fazdan katı faza geçecek olan sıvı atomları hızlandırmış ve katılaşma hızını artırmıştır. Yani atomik kütle transfer hızı elektrik alan etkisiyle artmıştır. Bu hızlandırmanın katılaştırılan alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisi gelecek bölümde incelenecektir.

Sadece elekrtik alan etkisini gözlemlemek için uygulanan elektrik alan; olası elektrik ark, elektropuls veya elektrik akımından kaçınılarak uygulanmıştır. Belirlenen büyüklükte voltaj DC cihazı yardımıyla uygulandıktan sonra soğutma suyu açılarak silindirik soğutma tankından düşük sabit bir hızda önceden sabitlenen sıcaklıktaki suyun dolaşımı sağlanır. Isıtıcı fırının giriş gücü kapatılır ve sıvı alaşımın uygulanan düzgün statik yüksek elektrik alan altında aşağıdan yukarıya yönlü katılaşması sağlanır. Isıtıcı fırının sıcaklığı, içindeki alaşımın ötektik sıcaklığının yaklaşık $100C^{0}$ altına indiğinde ergiyiğin lektrik alan altında tamamen katılaştığı gözlenmiş ve DC güç kaynağı kapatılmıştır. Bu süreç yaklaşık 20-25dk kadar zaman almaktadır. Katılaştırma tamamlandıktan sonra elektrik alan altında katılaşan mikroyapıyı korumak için numunler hiç bekletilmeden fırından alınır ve $25C^{0}$ sıcaklıkta su havuzuna sokarak hızla soğutulur. Böylelikle elektrik alan altında bir katılaştırma deneyi gerçekleştirilmiş olur.

Yapılan tüm katılaştırma deneyleri aynı katılaştırma koşullarında farklı yön ($E_{+}$,ve $E_{-}$) ve büyüklüklerde gerçekleştirilmiştir. Bunların yanında her bir alaşım grubu için kontrol numunesi olarak aynı katılaştırma koşullarında birer elektrik alansız numune katılaştırılmıştır. Katılaştırmadan elde edilen örnek bir numune şekil 3.26 de gösterilmiştir.



**Şekil 3.26** Katılaştırma deneyleri sonucu elde edilen bir numune örneği

Elektrik alan E, ölçümlerinden gelen tahmini hata eşitlik (3.2) de verildiği gibi voltaj okumadan gelen kesirli belirsizlik ve mesafe okumadan gelen kesirli belirsizliğin toplamı şeklindedir:

$$\left|\frac{\Delta E}{E}\right| = \left|\frac{\Delta V}{V}\right| + \left|\frac{\Delta X^{*}}{\Delta X}\right| \tag{3.2}$$

Burada $\Delta V$ voltaj okumalarından gelen belirsizliktir, V uygulanan voltaj, $\Delta X^{*}$ mesafe ölçümünden gelen belirsizlik ve $\Delta X$ numune ve paslanmaz çelik arasından ölçülen sabit mesafedir. Elektrik alan ölçümlerindeki toplam tahmini hata voltaj okuma ve mesafe ölçümündeki yaklaşık hatanın toplamıdır. Doğrudan cihaz ekranı üzerinden yapılan voltaj okumalarında yapılan teknik kontrol sonucu belirsizlik %0,3 olarak ölçülmüştür. Hata hesabında bir diğer değer olan msafe ölçümünde; elektrik alanın hesaplanmasında kullanlan numune ve paslanmaz çelik disk arasındaki boşluk fotoğraflarla ±0,5mm hassasiyetle ölçülmüştür. Bu ölçümlerde şekil 3.17'deki mekanizma üzerinden yapılan ölçümlerdeki toplam sabit mesafeler yaklaşık 18mm'dir. Bu durumda mesafe ölçümlerinden gelen kesirli belirsizlik yaklaşık %2,7 civarındadır. Dolayısıyla, elektrik alan ölçümlerindeki toplam tahmini hata yaklşık %3,0 tür.

### 3.3.3 Numunelerin Hazırlanması

Uygulanan elektrik alanın alaşımların mikroyapılarına etkisinin gözlenmesi için numuneler kesme, monteleme, zımpralama, parlatma ve dağlama gibi bir dizi metalografik işlemlerden geçirilmelidir. Metalografik işlemlere öncelikle kesme işlemiyle başlanmaktadır.

#### 3.3.3.1 Kesme İşlemi

Kesme işleminde en önemli iki nokta; kesme sırasında numunlerin mikroyapılarının herhangi bir darbe ya da ortaya çıkacak sıcaklık neticesinde mikroypıların değişmemesi ve görüntülemede yanıltıcı sonuç verecek bir kesme eğriliği oluşmamasıdır. Bu yüzden son olarak ani soğutulmuş 10mm çap ve 80mm uzunluğunda elde edilmiş numuneler Metkon microcut 150 tipi hassas kesici(şekil 3.27) kullanılarak bor yağı altında soğutmalı kesme işlemleri yapılmıştır.




**Şekil 3.27** Deneysel çalışmalarda kullanılan hassas kesici

Öncelikle her numuneden olası oksit tabakası ve curuf bölgesini elimine etmek amacıyla numunelerin üst kısmından 3-5mm lik bir kısım kesip atılmıştır. Daha sonra kalan numunlerin tepe notalarından itibaren; Al-Cu alaşımı için üstten 5, 15, 25mm mesafede 3 adet ve Al-Ni alaşımı için 5 ve 15mm mesafeden 2 adet 10mm uzunluğundaki parçalar incelenmek üzere kesilmiştir. Bunun amacı numunelerin kendi içlerinde numune boyunca mikroyapılarında bir değişiklik olup olmadığını görmekir.

### 3.3.3.2 Monte İşlemleri

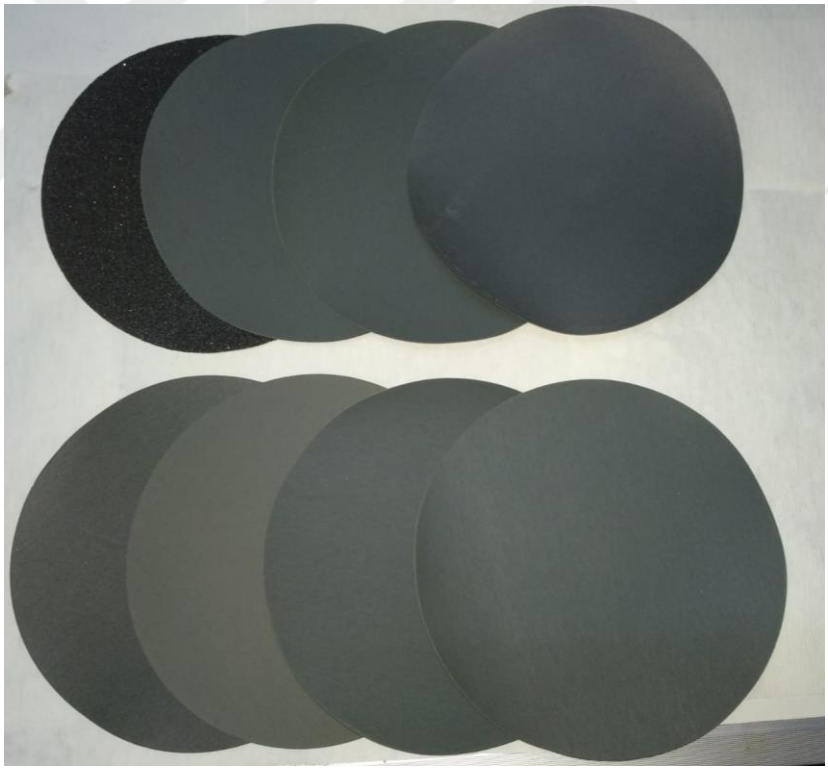
Kesilen numunlerin zımparalama parlatma işlemlerinde kolaylık sağlaması için kalıplanması gerekmeketedir. Bunun için numunlere şeffaf epoksi reçine ile monte işlemi yapılmıştır. Montelenecek numunelerin boyutlarına uygun plastik kalıplar temin edilmiş ve kalıplama yapılacak düzgün cam yüzeye sabitlenmştir. Kalıplardan sıvı reçinenin sızmaması ve katılaşan reçinenin kalıplardan rahat çıkması için kalıpların içi ve dışı vazelin ile sıvanmıştır. Numunler kalıpların içine yerleştirlmiş ve hazırlanan epoksi reçine ve sertleştirici karışımı kalıplara dökülerek sertleşmeye bırakılmıştır. Sertleşen monte malzemesi plastik kalıptan çıkarılarak numuneler zımparlama parlatma işlemleri için hazır hale getirilmiştir (şekil 3.28).



**Şekil 3.28** Metalografik işlemler için montelenmiş numuneler

### 3.3.3.3 Zımparalama ve Parlatma İşlemleri

Zımparalama işlemleri, silisyum karbür taneler içeren sırasıyla 60-2000 aralığında değişen grid(tane sayısı) boyutlarındaki zımpara kağıtları (şekil 3.29) kullanılarak yapılmıştır.



**Şekil 3. 29** Farklı aşındırıcı boyutlarındaki SiC zımpara kağıtları

Kabadan inceye doğru yapılan zımparlama işlemlerinde numunelerin ısınmaması için sürekli su altında zımparalama işlemi yapılmıştır. Her zımpara kağıdı

değiştirildiğinde bir önceki işlemden gelebilecek kaba parçacıkların elimine edilmesi için numune önce saf suda daha sonra alkolle yıkanarak kurutulur ve diğer zımparalama kademesine bu şekilde geçiş yapılır. Zımparalama işlemlerinden sonra metalogarfinin bir diğer kademesi olan parlatma işlemine geçilmiştir. Zımparalama ve parlatma işlemleri Struers Minitech263 otomatik zımparlama/parlatma cihazıyla yapılmıştır (şekil 3.30).




**Şekil 3.30** Zımparalama ve parlatma işlemlerinde kullanılan otomatik yüzey hazırlama cihazı

Parlatma işlemlerinde kabadan inceye doğru sırasıyla 6µm, 3µm, 1µm, 0,25µm ve 0,05µm boyutlarında elmas partiküller içeren süspansiyonlar kullanılmıştır. Her bir süspansiyon için ayrı üretilmiş çuhalar parlatma cihazındaki diske yerleştirilmiş ve gerekli miktar elmas süspansiyon çuha üzerine yayılarak verimli bir parlatma işlmi için hazırlanmıştır. Numunelerin aşırı ısınmasının önlenmesi ve rahat bir parlatma işlemi yapılması için ihityaç duyuldukça yağlayıcı lubrikant çuha üzerine püskürtülmüştür. Her bir parlatma kademesine geçişte numuneler saf suda ultrasonik banyoda temizlenmiş banyodan çıkan numuneler alkollenerek kurutulmuş ve diğer kademeye bu şekilde geçilmiştir. En son 0,05µm boyutlu

parlatma da yapıldıktan sonra; ultrasonik temizlik, saf suyla yıkama, alkolle yıkama ve kurutma makinesiyle kurulama işlemleri yapılarak numuneler dağlama işlemine hazır hale getirilmiştir. Parlatma işlemleri sırasında kullanılan süspansiyonlar ve çuhalar şekil 3.31' de görülmektedir.




**Şekil 3.31** Parlatma işlemlerinde kullanılan süspansiyonlar ve özel çuhaları

### 3.3.3.4 Numunelerin Dağlanması

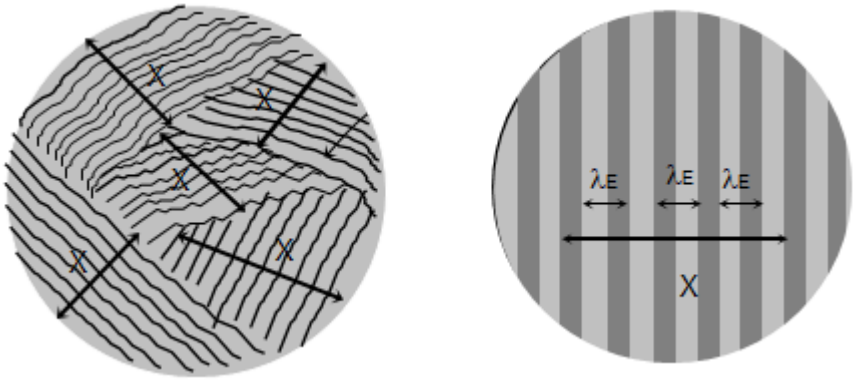
Numunlerin mikroskop altında mikroyapılarının net görülebilmesi ve incelenbilmesi için numune yüzeylerinde bir kontrast farkı oluşturulmalıdır. Bunun için numuneler doğru bir kimyasal ile muameleye sokularak farklı fazların kimyasala verdiği farklı tepkilerden yararlanılarak yüzeylerde kontrast farkı oluşturulabilir. Bu işleme metalografide kimyasal dağlama işlemi denmektedir. Bu çalışmada üretilen Al-Cu ve Al-Ni ötektik alaşımları için dağlayıcı olarak Keller çözeltisi seçilmiş ve güzel sonuçlar alınmıştır. Keller çözeltinin içeriği 100ml bir çözelti için 1,5ml hidroklorikasit(HCl), 1ml HF, 2,5ml $HNO_3$ ve 95ml saf su şeklindedir. Numunler yeterli genişlik ve derinlikteki saat camı içinde 35-40sn

aralığında keller çözeltisine maruz bırakılmış ve Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni öetktik alaşımların karakteristik mikroyapıları ortaya çıkarılmıştır.

### 3.3.4 Mikroyapıların Görüntülenmesi ve Ölçüm Yöntemleri

Ötektik Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni alaşımları mikroyapıları çok iyi bilinen iki alaşım türüdür. Al-%33Cu lamelsel ötektik sınıfına en iyi örneklerden biridir ve $Al_{\alpha}$ ve $CuAl_2$ fazları olarak katmanlardan (lamellerden) oluşur. Al-%6,4Ni alaşımı ise $Al_{\alpha}$ matris fazı içinde $Al_3Ni$ çubuksu fazıyla çubuksal ötektik mikroyapılara iyi bir örnektir. Dağlama sonrası numunlerin mikroyapı görüntüleri Nikon ECLİPSE MA100 model optik ters metal mikroskobuyla alınmıştır. Her iki alaşım için de hem ötektik mesafelerin ($\lambda$) hem de ötektik tane boyutlarının (ÖTB) ölçümü için farklı büyütmelerde ve numunelerin enine kesitlerinden birçok görüntü alınmıştır. $\lambda$ ve ÖTB ölçümleri Nikon firmasının sunduğu NIS-Elements Version4.3 yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Al-Cu ötektik alaşımının ötektik mesafe yani lameller arası mesafe ölçümleri lineer kesişim metodu kullanılarak yapılmıştır [91]. Bu ölçüm metodunun şematik gösterimi şekil 3.32'de gösterilmektedir.



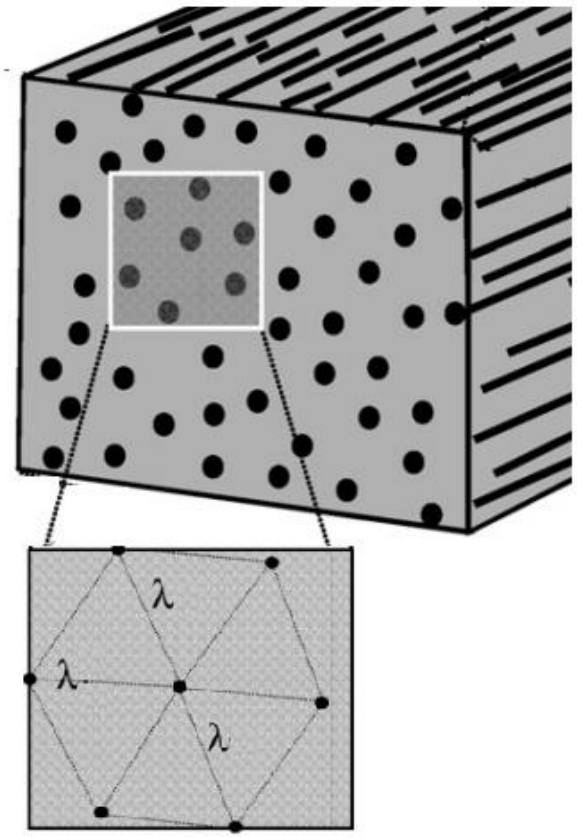

**Şekil 3.32** Ötektik lameller arası mesafe ölçümleri şematik gösterimi

Ötektik lamel mesafe ölçümleri aşağıdaki eşitlik 3.3'e göre hesaplanmıştır.

$$\lambda_E = \frac{X}{n-1} \tag{3.3}$$

Burada $\lambda_E$ lameller arası mesafe, X ölçülen toplam mesafe, n ölçülen toplam mesafedeki lamel sayısıdır. İstatiksel olarak güvenilirliği artırmak için çok sayıda görüntü alınmış (her bir numune için en az 12) ve her görüntüden en az 10 ölçüm yapılmıştır.

Al-Ni ötektik sistem çubuksal(rod) yapılı mikroyapıya sahiptir. Çubuksal yapılı sistemlerde ötektik mesafe ölçümleri için iki metod vardır. Bunlardan biri alan içindeki rod sayma metodudur[92]. Diğer metod ise üçgen metodudur[92]. Üçgen metodunda üç komşu çubuğun merkezleri bir üçgen oluşturmak üzere birleştirilir ve üçgenin her bir kenarı ötektik mesafeye($\lambda$) karşılık gelir. Bu çalışmada üçgen metodu kullanılmıştır. İstatiksel hatayı en aza indirmek için görüntüde (her numune için en 12) çok sayıda üçgen (her görüntüde yaklaşık 30 ölçüm) oluşturulmuştur. Üçgen (triangel) metodunun şematik gösterimi şekil 3.33'da gösterilmiştir.




**Şekil 3.33** Ötektik çubuk(rod) mesafelerin ölçümü şematik gösterim

İki alaşımın da ötektik tane boyutu ölçümleri yukarıda anılan mikroskop ve yazılımı ile alansal olarak hassas bir şekilde yapılmıştır. Tane boyutu görüntüleri 10X ve 5X

büyütmlerede çekilmiştir. İstatitiksel olarak güvenilirliği artırmak için çok sayıda görüntü alınmış ve bu görüntülerdeki tanelerin hepsinin ölçümü yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar üzerinden yapılan hata analizinde standart sapma değerleri de hesaplanarak ötektik mesafe ölçümlerinden gelen istatistiksel hata yaklaşık %10, tane boyutu ölçümlerinden gelen istatistiksel hata alansal olup yaklaşık %20 civarındadır.

### 3.3.5 Sertlik Ölçümleri

Sertlik, malzemelerin mekanik özellikleri hakkında fikir veren en önemli parametrelerden biridir. Metaller için sertlik; malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir[93]. Al-Cu ve Al-Ni ötektik alaşımlarında mikroyapı çok farklı özelliklere sahip iki ayrı fazın bir arada bulunduğu yapılardır. Buna dayandırılarak ötektik alaşımlar kompozit olarak da adlandırılabilmektedir. Böyle bir mikroyapıdan homojen bir sertlik ölçümü alabilmek için yapıdaki fazları ortak kapsayacak şekilde nispeten geniş bir alandan ölçüm almak gerekir. Bu şartlar için en ideal sertlik ölçme yöntemi olarak Brinell sertlik ölçme yöntemi(HB) seçilmiştir. HB ölçüm metodu eşitlik (3.4) ile ifade edilir:

$$HB = \frac{2F}{\pi D\left[ D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]} \tag{3.4}$$

Burada F uygulanan yük, D bilye çapı ve d oluşan iz çapıdır.

Sertlik deneyleri 2,5mm çapında çelik bilye kullanılarak, 62,5 kg lık yük altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler için Yıldız Teknik Üniversitesi akredite mekanik muayene laboratuarında bulunan kalibrasyonu yapılmış Bulut rbov-200 tipi sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Deneylerde uygulanan yükün doğruluğunu kontrol etmek için d/D oranı kontrol edilmiştir. Buna göre doğru yükleme durumlarında d/D oranı 0,2-0,7 aralığında olmalıdır. Yapılan deneylerde bu oran 0,4-0,5 aralığında ölçülmüştür.

HB öçümlerinde tahmini deneysel hata, kullanılan bilye çapının(D) ölçümünden ve iz çapının(d) ölçümünden kaynaklanır. Buna göre toplam hata, D ve d'nin ölçümündeki kesirli belirsizliğin toplamıdır ve eşitlik (3.5) ile ifade edilir:

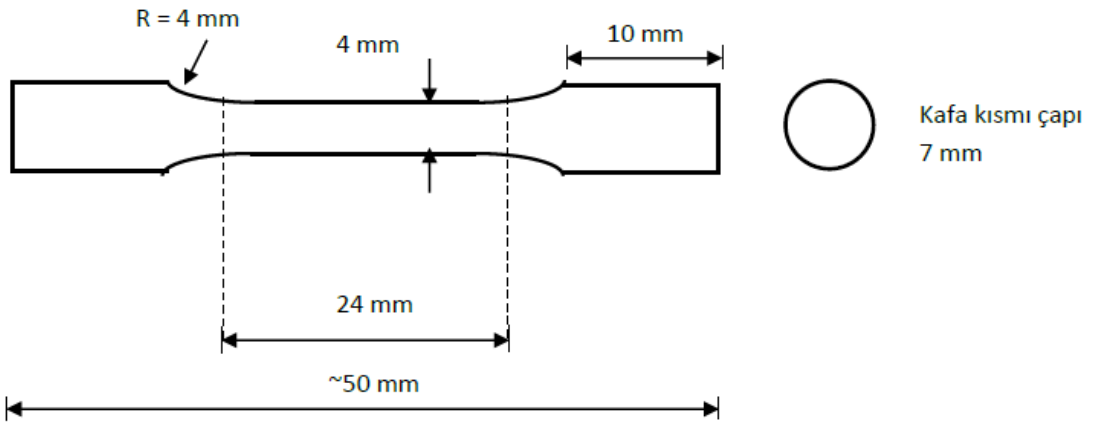
$$\left|\frac{\Delta HB}{HB}\right| = 2\left|\frac{\Delta D}{D}\right| + 2\left|\frac{\Delta d}{d}\right| \tag{3.5}$$

D'nin hassas kumpaslar yardımıyla ölçümünden gelen hata %1 ve d'nin örnek görüntülerinden ölçülen hata da yaklaşık %1 hassasiyetindendir. Böylece sertlik ölçümlerinden gelen toplam tahmini deneysel hata %4 olarak bulunur.

### 3.3.6 Çekme Dayanımı Testi

Çekme testi malzemelerin mekanik davranışları hakkında önemli bilgiler veren başka bir karakterizasyon yöntemidir. Metallerin ve plastik malzemlerin mekanik dayanmlarına yönelik özelliklerini belirlemede yaygın olarak kullanılır[93]. Bu test sayesinde çekme mukavemeti, elastik modül, süneklik vb gibi malzemelerin birçok mekanik özelliği belirlenebilir. Mevcut çalışmada elektik alanın alaşımların mikroyapı ve dolayısıyla mekanik özelliklerine etki edip etmediği araştırılmıştır. Bunun teyidi için bu testin en önemli çıktısı olan çekme mukavemeti her iki alaşım için de akredite laboratuarlarda akredite cihaz ve personel yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır.

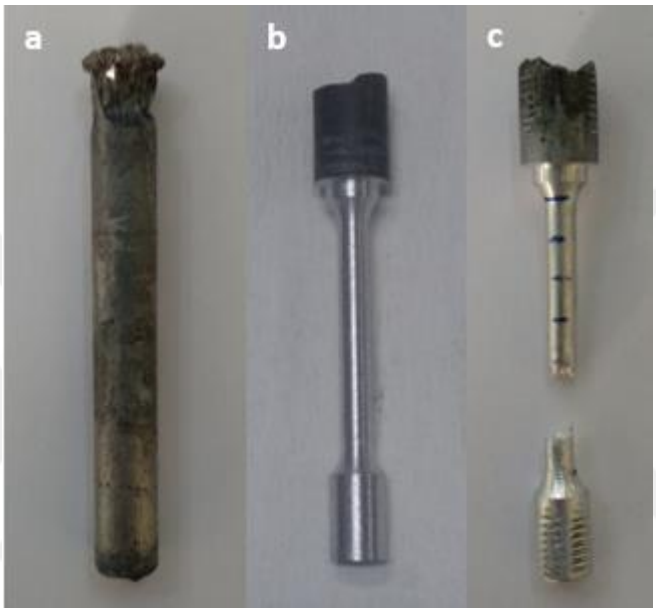
Farklı yön ve büyüklüklerde elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ve Al-Ni alaşımları öncelikle standartlara uygun bir çekme numunesi/çubuğu haline getirlmesi yani talaşlı işlenmesi gerekir. Bunun için numuneler şekil 3.34 de görülen standartlara (ASTM E 8M-4) uygun ölçülere göre işlenmiştir.




**Şekil 3.34** Standartlara uygun çekme numunesi ölçüleri

Talaşlı işleme işlemleri Yıldız Teknik Üniversitesi bünyesindeki prototip atölyesinde CNC torna teknisyenleri tarafından Takisawa nex-108m tipi CNC makinesiyle yapılmıştır.

Böylelikle elektrik alan altında katılaştırılan ve kontrol numunesi olarak elektrik alansız katılaştırılan numunelerin tümü çekme testine hazır hale getirilmiştir. Çekme testi için hazırlanan ve çekme işlemi uygulanmş numune örneği Şekil 3.35'da gösterilmiştir.




**Şekil 3.35** Çekme testleri için hazırlanan numuneler; (a) işlenmeden önce, (b) işlenmiş numune, (c) çekme testine tabi tutulmuş numune

Çekme çubuğu haline getirilen numuneler Yıldız Teknik Üniversitesi merkez laboratuarı bünyesindeki akredite mekanik muayeneler laboratuarında uzman personel eşliğinde çekme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemde INSTRON 8872 tipi çekme cihazı(şekil 3.36) ve entegre Bluehill yazılımı kullanılmıştır.

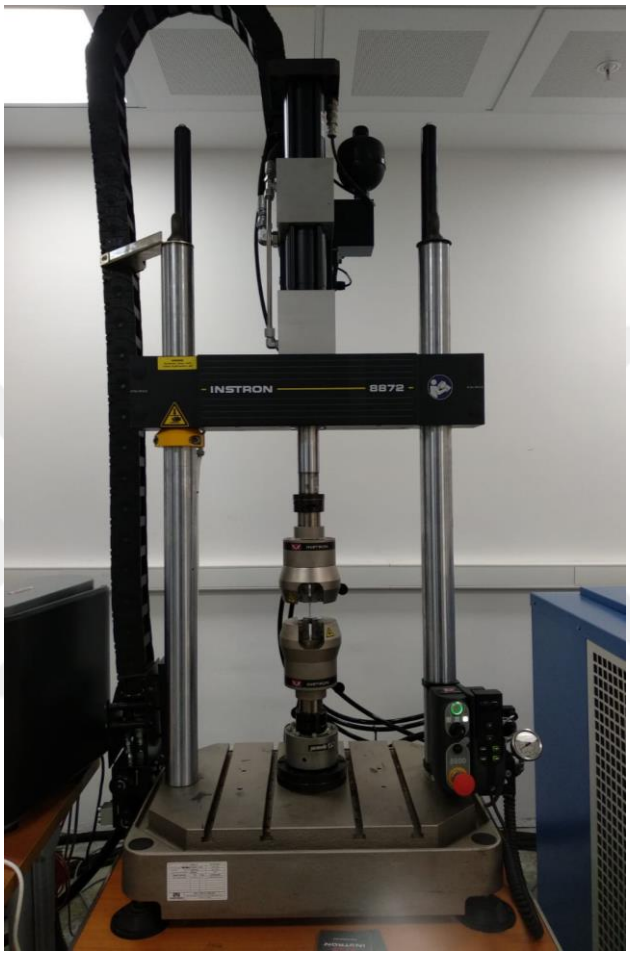
Çekme testleri oda sıcaklığında 1mm/dk hızında çekilerek gerçekleştirilmiştir. Çekme dayanımı(σ) değerleri eşitlik (3.6)'ya göre belirlenmektedir:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{mg}{\pi r^2} \tag{3.6}$$

Burada σ çekme dayanımı($Nmm^{-1}$ veya MPa), F uygulanan güç(N) ve A numunenin enine kesit alanıdır. Buna göre nihai çekme dayanımındaki belirsizlik:

$$\left|\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right| = 2\left|\frac{\Delta r}{r}\right| \tag{3.7}$$

Eşitliği ile hesaplanır. Buna bağlı yapılan ölçümlerde çekme dayanımı ölçümünden gelen tahmini deneysel hata %2 civarındadır.




**Şekil 3.36** Çekme testlerinin gerçekleştirildiği çekme cihazı

Bu bölümde ilk defa tasarımı düşünülüp kurulumu yapılan deneysel sistem ve yöntemler doğrultusunda Al-%30Cu ve Al-%6,4Ni ötektik sıvı alaşımları katılaştırma doğrultusunda fakat katılaşma yönü ile aynı ve zıt yönde ve farklı büyüklüklerde uygulanan durgun elektrik alan altında katılaştırılmıştır. Farklı yön ve büyüklükte uygulanan durgun elektrik alan altında katılaştırılan Al-%30Cu ve Al-%6,4Ni ötektik alaşımlarının mikroyapıları (ötktik mesafeler ve tane büyüklükleri) ve mekanik özellikleri (sertlikleri ve çekme dayanımları) standart metodlarla ölçülmüştür ve elde edilen sonuçlar gelecek bölümde sunulacaktır.

# 4
# SONUÇ VE ÖNERİLER

## 4.1 Giriş

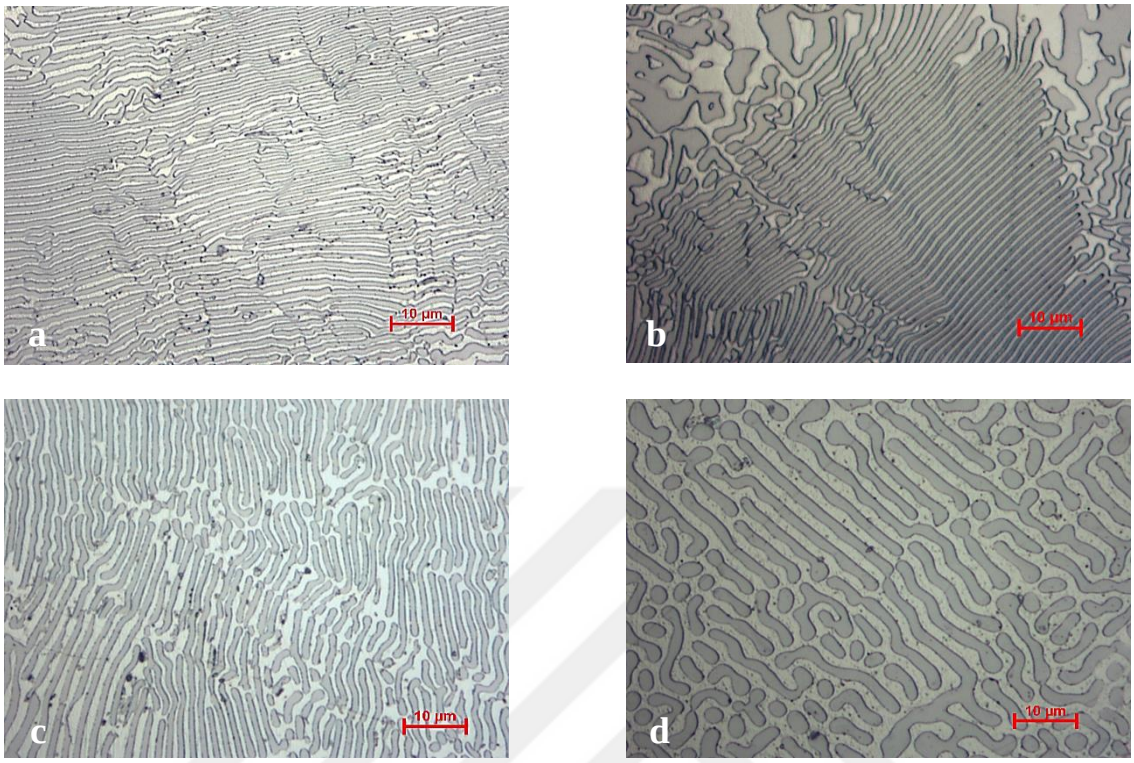
Bu bölümde üçüncü bölümde ayrıntılı izahı yapılan deneysel sistem ve ölçüm yöntemleri doğrultusunda elde edilen sonuçlar verilecektir. Bu kapsamda farklı yön ve büyüklükte düzgün elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ve Al-Ni ötektik numunelerinden ayrı ayrı gözlenen mikroyapı görüntüleriyle birlikte ölçülen mikroyapı ($\lambda$, ÖTB) ve mekanik özelliklerin(HB ve $\sigma$) ölçüm ve istatistiksel hatalarıyla birlikte tablolar halinde verilecek , ölçülen $\lambda$, ÖTB, HB ve $\sigma$ değerlerinin eletrik alanının büyüklüğü ile değişim grafikleri çizilerek aralarındaki ilişki lineer regrasyon analizi ile belirlenecektir ve her bir sonucun ayrı ayrı yorumlanması, tartışılması ve literatürle kıyası yapılacaktır. Son olarak genel sonuçlarla birlikte sonraki çalışmalara dair önerilerde bulunulacaktır.

## 4.2 Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni Sistemlerinde Mikroyapı Parametrelerinin Durgun Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

### 4.2.1 Al-Cu Ötektik Sisteminde Lamelsel Ötektik Mesafenin Durgun Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

Farklı yön ve büyüklükte durgun elektrik alan altında ve elektrik alansız katılaştırılmış olan Al-%33Cu ötektik sisteminini numunelerinin enine kesitlerinden çekilen optik görüntülerinden doğrusal kesişim yöntemiyle lamelsel mesafeler ($\lambda$) ölçülerek hesaplanmıştır. Farklı yön ve büyüklükteki durgun elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımının örnek optik görüntüleri şekil 4.1 ve şekil 4.2 de gösterilmiştir. Burada şekil 4. 1 pozitif elektrik alan altında yani katılaşma yönüyle aynı yönde ($E_+$) ve şekil 4.2 ise negatif elektrik alan altında yani katılaşma yönüyle zıt yönde ($E_-$) uygulanan elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu alaşımlarının mikroyapılarıdır. Değişimin net gözlenebilmesi için ve kontrol

numunesi olarak hazırlanan, her şeklin *a* görseli elektrik alansız katılaştırılan numunenin örnek görüntüsüdür.

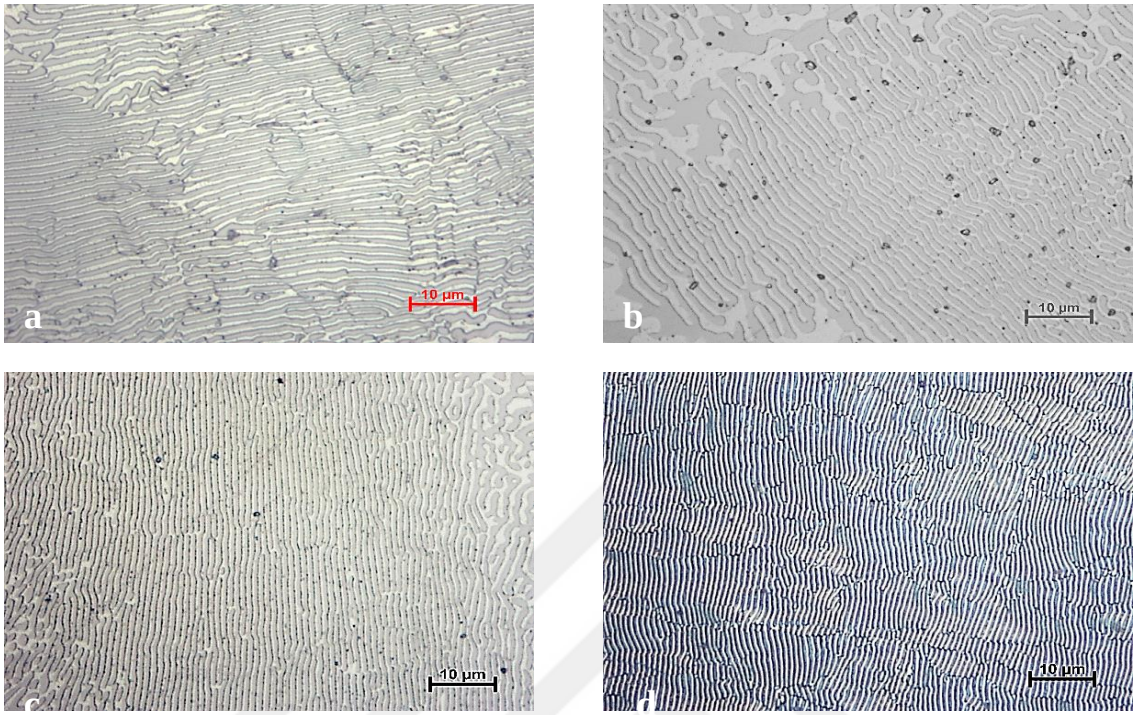



**Şekil 4.1** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımının tipik mikroyapı optik görüntüleri; (a) elektrik alansız, (b) 8,1kV/cm, (c) 8,8kV/cm ve (d) 10,0kV/cm

Her katılaşma kademesindeki numune için (elektrik alansız ve elektrik alan altında) kendi uzunluğu boyunca bir fark olup olmadığını görmek için her numunenin en üst noktasından itibaren üç farklı mesafedeki (5-15-25mm) kesitinden λ mesafeleri ölçülmüştür. Elektrik alansız ve farklı yön ve büyüklükteki elektrik alan altında katılaştırılan numune kesitlerinden alınan ölçümler tablo 4.1 ve tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.1 farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan numunelerin λ değerlerini ve tablo 4.2 farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan numunelerin λ değerlerini vermektedir.

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 den de görüldüğü gibi alansız ve alanlı her bir katılaştırma kademesinde Al-%33Cu ötektik sisteminin boyuna incelenmesinde numunelerin lamellar arası mesafesinde, λ görülebilir bir değişim göstermediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, her bir katılaşma aşaması için Al-%33Cu ötektik sisteminde numune

boyunca alınan λ ölçümlerin ortalaması alınarak istatistiksel hatalarıyla birlikte Tablo 4.1 ve Tablo 4.2 verilmiştir.




**Şekil 4.2** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tipik mikroyapı optik görüntüleri; (a) elektrik alansız, (b) 7,8kV/cm, (c) 8,9kV/cm ve (d) 10,2kV/cm

Şekil 4.1 ve tablo 4.1 den görüleceği üzere $E_+$ 'nin artmasıyla birlikte $\lambda_{+,ortalama}$ değeleri de artış göstermiştir. Bu durum 3. Bölümde de açıklandığı gibi: Sıvı atomlar uygulanan pozitif yüksek gerilimle pozitif olarak yüklenerek sıvı katyon haline gelmektedir ($Al^{+3}$ve $Cu^{+}$). Uygulanan durgun elektrik alandan kaynaklı pozitif olarak yüklenmiş bu sıvı atomlara alan yönüyle aynı yönde olacak şekilde bir elektrik kuvveti ($F_+$) etkiyecektir. Etkiyen bu kuvvet sıvı fazdan katı faza geçen atomları yavaşlatacak ve geçiş sayısını azaltacaktır, yani şekil 3.24'de gösterildiği gibi sıvı fazdan katı faza kütle aktarım hızını(mass transfer) azaltır yani katı-sıvı arayüzeyinin ilerlemesini yavaşlatır. Bu yavaşlatma tablo 4.1'den görüleceği üzere lamellar arası measfenin büyümesine sebep olmaktadır. Bu durum katı-sıvı arayüzeyinin büyüme hızının azalması ve lamel mesafelerin uygulanan $E_+$ ile birlikte oluşan $F_+$'nin artmasıyla arttığı sonucunu doğurmuştur. Tablo 4.1'e baktığımızda

elektrik alansız numunede 0.805μm olan $\lambda_{+,ortalama}$ değeri, 10kV/cm uygulanan $E_+$ değeriyle yaklaşık iki katına çıkarak 1.671μm olarak ölçülmüştür.

**Tablo 4.1** Farklı büyüklükte uygulanan pozitif elektrik alan altında katılaştırılmış Al-Cu ötektik alaşımında ölçülen ötektik lameller arası mesafe

| **Pozitif yönde uygulanan statik elektrik alanı, $E_+$ (kV/cm)** | **0** | **8,1** | **8,8** | **10,0** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Lameller arası mesafe , $\lambda_+$ (μm)** | 0,837 | 1,16 | 1,493 | 1,938 | 5 |
| | 0,780 | 0,81 | 1,031 | 1,396 | 15 |
| | 0,798 | 0,825 | 1,006 | 1,68 | 25 |
| **Ortalama lameller arası mesafe, $\lambda_{+,\ ortalama}$, (μm)** | **0,805±0,07** | **0,932±0,09** | **1,177±0,07** | **1,671±0,11** | |

**Tablo 4.2** Farklı büyüklükte uygulanan negatif elektrik alan altında katılaştırılmış Al-Cu ötektik alaşımında ölçülen ötektik lameller arası mesafe

| **Negatif yönde uygulanan statik elektrik elektrik alanı, $E_-$ (kV/cm)** | **0** | **7,8** | **8,9** | **10,2** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Lameller arası mesafe, $\lambda_-$ (μm)** | 0,837 | 0,817 | 0,6126 | 0,4680 | 5 |
| | 0,780 | 0,7711 | 0,6444 | 0,4472 | 15 |
| | 0,798 | 0,7955 | 0,5610 | 0,4778 | 25 |
| **Ortalama lameller arası mesafe, $\lambda_{-,\ ortalama}$, (μm)** | **0,805±0,07** | **0,795±0,09** | **0,606±0,06** | **0,464±0,03** | |

Negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-%33Cu alaşımlı numunelere baktığımızdaysa şekil 4.2 ve tablo 4.2 den görüleceği üzere $\lambda_{-,ortalama}$ değerleri negatif elektrik alan değeri($E_-$) arttıkça azalmıştır. Bunun sebebi negatif elektrik alan durumunda sistemin kurulumu gereği ergiyik alaşım toprağa bağlanır ve böylece sıvı Al ve Cu atomları en yüksek enerji düzeyindeki elektron veya elektronları kaybederek pozitif yüklü iyonlar haline geçerler ($Al^{+3}$ve $Cu^{+}$). Bu kez paslanmaz çelik disk üzerinden uygulanan durgun elektrik alanından dolayı pozitif olarak yüklenmiş sıvı katyonlara alan yönüyle aynı yönde (fakat bu kez katı-sıvı arayüzeyin büyüme yönüne ters) bir elektrik alan kuvveti($F_-$) etki eder. Bu durumda sıvı katyonlara ($Al^{+3}$ve $Cu^{+}$) etkiyen alan kuvveti sıvı fazdan katı faza geçecek olan sıvı atomları hızlandırmış ve katılaşma hzını artırmıştır. Yani atomik kütle transfer hızı negatif elektrik alan etkisiyle artmıştır (şekil 3.25). Sonuç olarak tablo 4.2'den görüleceği üzere uygulanan $E_-$ ile birlikte lamellar arası mesafe azalmıştır. Tablo 4.2'den elektrik alansız numunenin $\lambda_{-,ortalama}$ değeri(0.805μm), uygulanan 10.2 kV/cm $E_-$ değeriyle yaklaşık yarısına düştüğü (0.464 μm) gözlenmiştir.

$\lambda_{ortalama}$ değerlerinin $E_+$ ve $E_-$ değerleri ile ilişkisini ortaya koymak için log-log grafiği çizdirilmiş bu grafik şekil 4.3'de verilmiştir. Özet olarak tablo 4.1, tablo 4.2 ve şekil 4.3'te gösterildiği gibi $\lambda_{+,ortalama}$ değerleri $E_+$ değeri arttıkça artmış, $\lambda_{-,ortalama}$ değeri ise uygulanan $E_-$ değeri arttıkça azalmaktadır.

Al-Cu ötektik alaşımında lamelsel ötektik mesafelerin uygulanan durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğüne bağlılıkları lineer regresyon analizi ile

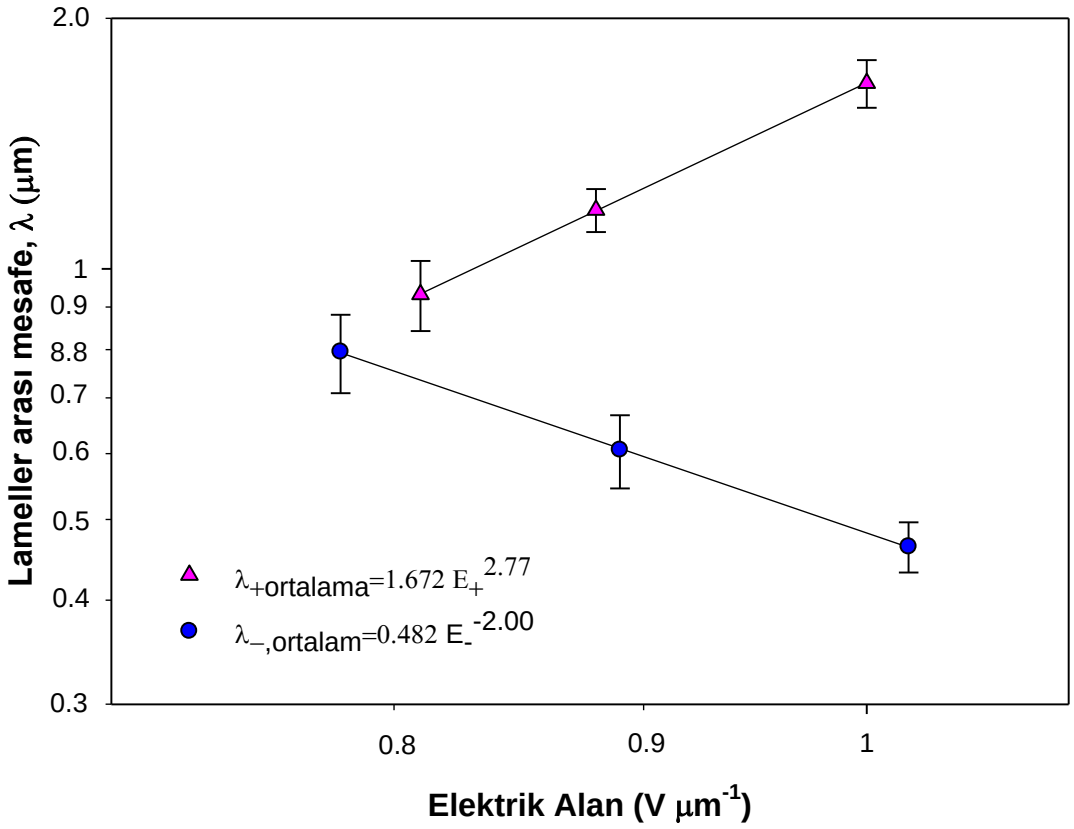
$$\lambda_{orta.(+)}^{AlCu} = 1,672E_{+}^{2,77} \tag{4.1}$$

$$\lambda_{orta.(-)}^{AlCu} = 0,482E_{-}^{-2,00} \tag{4.2}$$

olarak ortaya konmuştur. Burada $\lambda_{+,ortalama}$ ve $\lambda_{-,ortalama}$ değerlerinin $E_+$ ve $E_-$ büyüklüklerine üstel bağımlılıkları sırasıyla 2.77 ve 2.00 olarak bulunmuştur.

Ölçümler sonucu farklı yön ve büyüklükte elektrik alanın mikroyapılar üzerindeki etkisi net bir şekilde görünmekteyken, deneylerde bir numunenin kendi uzunluğu

boyunca(5, 15, 25mm) potansiyel gerilimi aynı olduğundan kendi içersinde kayda değer bir fark olmadığı görülmüştür.




**Şekil 4.3** Al-Cu ötektik alaşımında lameller arası mesafenin farklı yön ve büyüklükte uygulanan durgun elektrik alana bağlı değişimi

Katılaştırma hızı ile elektrik alan etkisi arasında bir kıyaslama yapmak ve elektrik alan etkisini bu anlamda daha net görebilmek için, literaturde Al-Cu ötektik sisteminde değişen katılaşma hızları için elde edilen λ değerlerine bakıldığında; Çadırlı ve arkadaşlarının[6] yaptığı çalışmada sabit sıcaklık gradyentinde (G=58,38 $^0$C/cm) V=483,2μm/s ve V=87,51μm/s katlaştırma hızlarında ölçülen lamelsel mesafe değerleri sırasıyla λ=0,78μm ve λ=1,48μm'dir. Bu değerler ise sırasıyla mevcut çalışmadaki λ=0,8μm(elektrik alansız) ve λ=1,67μm($E_+$=10kV/cm) ölçülen değerlere çok yakın değerlerdir.

Yapılan başka bir Al-Cu sistemindeki çalışmada[94] sabit sıcaklık gradyentinde (G=76K/cm) yapılan ölçümlerde V=600μm/s, V=300μm/s ve V=108μm/s

katılaştırma hızlarında ölçülen lamelsel mesafe değerleri sırasıyla λ=0,48μm, λ=0,70μm ve λ=1,12μm'dir. Buna karşılık mevcut çalışmada ise bu değerlere yakın sırasıyla λ=0,46μm ($E_{-}$=10,2kV/cm), λ=0,8μm (elektrik alansız) ve λ=1,67μm ($E_{+}$=10kV/cm) değerleri bulunmuştur.

Bayram ve Marasli'nin[95] yaptığı ağırlıkça Al-32,5Cu-1Ni üçlü ötektik çalışmasında ise sabit sıcaklık gradyentinde (G=4,93K/mm) mevcut çalışmaya kıyasla yakın lamelsel mesafe değerleri, V=1532,54μm/s katılaştırma hızında λ=0,44μm, V=162,85μm/s değerinde λ=0,77μm/s ve V=46,4μm/s değerinde λ=1,95μm bulunmuştur.

Bu kıyaslamalara bakıldığında mevcut çalışmada Al-Cu sisteminde katılaştırmalar tamamiyle aynı şartlarda olmasına ragmen farklı yön ve büyüklükte uygulanan elektrik alan kuvveti numunelerin sanki farklı katılaştırma hızlarında katılaştırılmış etkisi gösterdiği yani sıvı katı arayüzeyi etkilediği net bir şekilde gözlenmektedir. Mevcut çalışmada ölçülen $\lambda_{ort.}$ değerleri literature göre G=4,93K/mm sabit sıcaklık gradyenti için yaklaşık V=46 - 1532μm/s katılaştırma hızı aralığındaki, G=76K/cm sabit sıcaklık gradyenti için ise V=108 - 600μm/s katılaştırma hızlarında elde edilen $\lambda_{ort.}$ değerlerine denk gelmektedir.

Al-Cu iki bileşenli ve çoklu ötektik alşaımlarının doğrusal katılaştırma çalışmaları ve elde edilen bağıntılardan bazıları tablo 4.3'de verilmiştir. Tablo 4.3'de de görülebileceği gibi yapılan doğrusal katılaştırma çalışmalarında $\lambda$ 'nın sıcaklık gradyenti veya katılaşma hızına bağlılıkları üstel olarak 0,22−0,5 aralığında tespit edilmiştir. Yaptığımız çalışmada ise $\lambda$ 'nın durgun elektrik alana bağlılıkları üstel bulduğumuz değerler yaklaşık 2,00 ile 2,77 olup düşük üstel değer (2.00) literatürde bulunan hızın üstel değerinin 4 kat daha büyüklükte aynı veya zıt yönlü olma durumunda elektrik alan kuvvetinin mikroyapı üzerine etkisinin enaz doğrusal katılaştırmada etkili bir kontrol parametresi olan büyütme hızı kadar etkili bir kontrol parametresi olabileceğini göstermektedir. Yani doğrusal katılaştırma ile üretilmesi pek mümkün olamayan endüstriyel ürünlerin bu defa durgun elektrik alan altında katılaştırılmasıyal elde edilebileceği imkânını getirmektedir.

**Tablo 4.3** Al-Cu ikili veya üçlü ötektikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen lameller arası mesafenin katılaşma hızına ve elektriak alana bağılığını tanımlayan bağıntıları

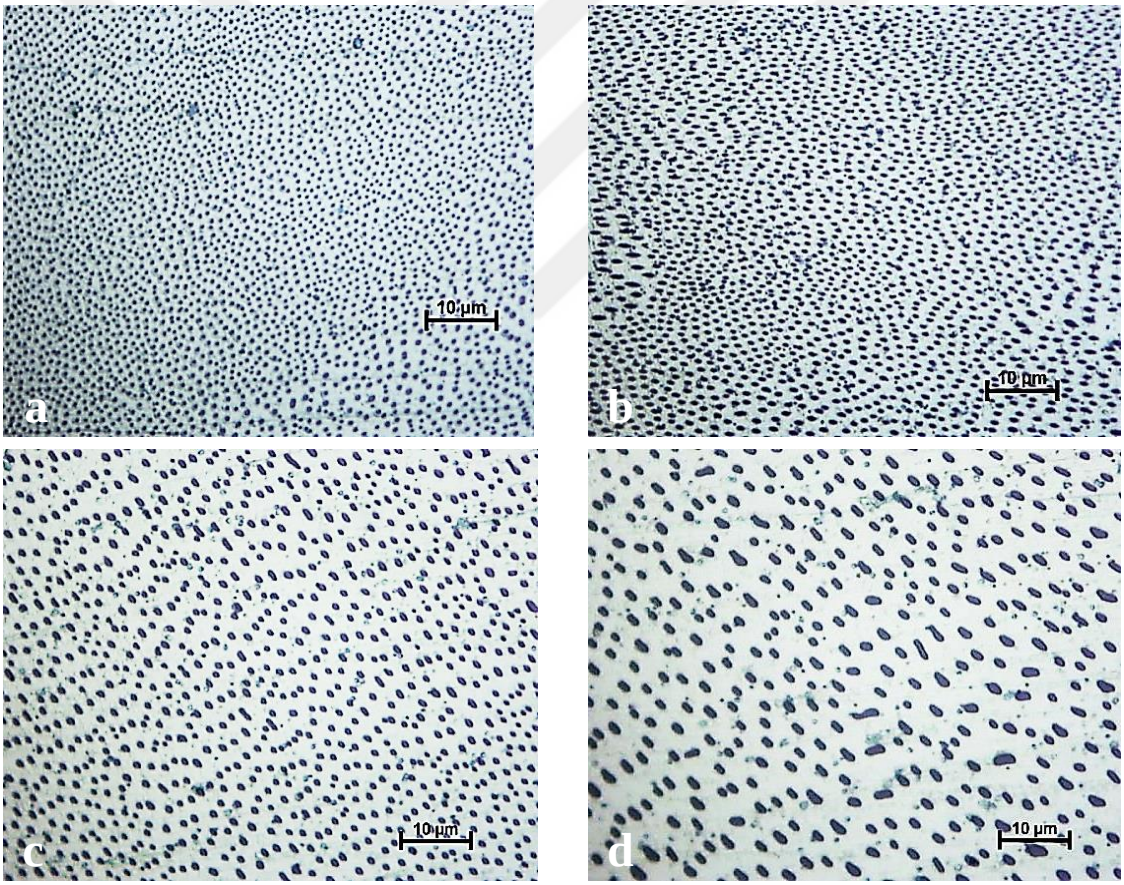
| Alaşım (%ağ.) | G(k/mm) | V(μm/s) | Bağıntı | Kaynak |
|---|---|---|---|---|
| Al-33 Cu | - | - | $\lambda_{-} = 0{,}482\ E_{-}^{-2{,}00}$ $\lambda_{+} = 1{,}672\ E_{+}^{2{,}77}$ | Bu çalışma |
| Al-12,6 Si | - | - | $\lambda_{-} = 87{,}09\ E_{-}^{-1{,}11}$ $\lambda_{+} = 0{,}006\ E_{+}^{2{,}56}$ | [96] |
| Al-33 Cu | 5,84 | 9,52-483,2 | $\lambda = 2{,}21\ V^{-0{,}39}$ | [6] |
| Al-33 Cu | 7,6 | 21,6-600 | $\lambda = 12{,}8\ V^{-0{,}5}$ | [94] |
| Al-32,5%Cu-1%Ni | 4,93 | 10-2000 | $\lambda = 7{,}05\ V^{-0{,}39}$ | [95] |
| Al-33Cu-0.1Ti | 6,45 | 8,58-2038,65 | $\lambda = 9{,}51\ V^{-0{,}41}$ | [97] |
| Al-30Cu-6Mg | 8,55 | 9,43-173,3 | $\lambda = 6{,}35\ V^{-0{,}35}$ | [98] |
| Al-28Cu-6Si-2,2Mg | 6,88 | 9,63-173,5 | $\lambda = 19{,}05\ V^{-0{,}41}$ | [99] |
| Al-26Cu-6,5Si-0,5Fe | 8,50 | 8,25-164,8 | $\lambda = 14{,}74\ V^{-0{,}50}$ | [100] |

Al-%12.6 Si ötektik alaşımımımını farklı yön ve büyüklükteki durgun elektrik alana altında katılaştırmış ve ötektik mesafenin uygulanan elektrik alanına bağlılığı $\lambda_{-} = 87{,}09\ E_{-}^{-1{,}11}$ ve $\lambda_{+} = 0{,}006\ E_{+}^{2{,}56}$ olarak elde edilimiştir. Al-Si ötektik alaşım sistemi de $E_{+}$ ve $E_{-}$ 'nin üstel değerleri sırasıyla 1,11 ve 2,56 olup mevcut çalışmada Al-Cu ötektik alaşımı için elde edilen üstel değerler sırasıyla 2,00 ve 2,77 dir. Üstel değerlerin kıyaslanması yapılırsa iki sistem için elde edilen E+ 'nin üstel değerleri birbirine çok yakın olmasına karşın Al-Si ötektik sistemi için elde edilen $E_{-}$ 'in üstel değeri Al-Cu ötektik sistemi için elde edilen üstel değerin yaklaşık yarısıdır. Bu farkın alaşımın bileşeni ve bileşiminden ziyade mikroyapı farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tabloda yapılan diğer çalışmalara bakıldığındaysa λ değerlerinin büyütme hızına bağlı üstel değerleri mevcut çalışmadaki λ değerlerinin elektrik alana bağlılıklarından çok düşüktür.

### 4.2.2 Al-Ni Ötektik Alaşımında Çubuksal Yapıdaki Ötektik Mesafenin Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

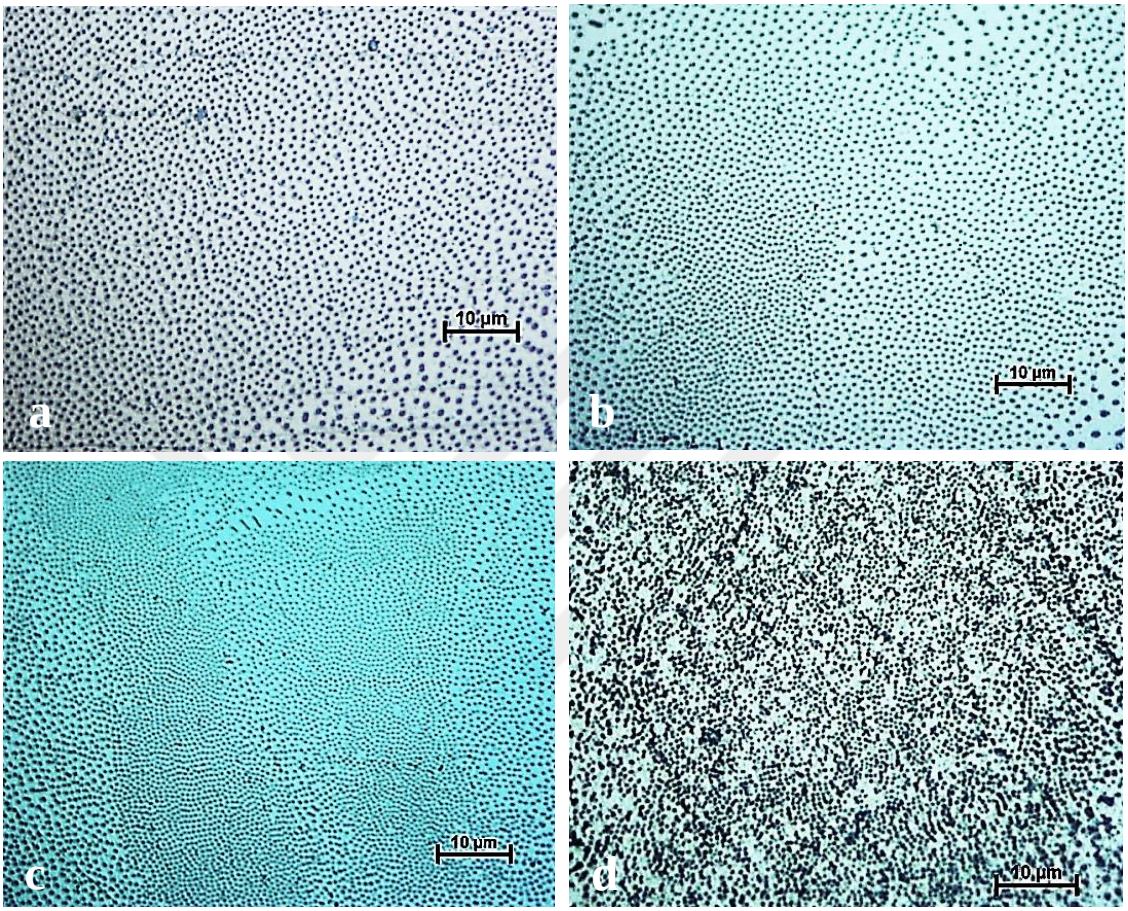
Karaktristik olarak lamelsel ötektik mikroyapıya sahip Al-%33Cu alaşımındaki sonuçlardan sonra, çubuk yapısını kontrol eden atomların difüzyonu ve transferi nedeniyle çubuksal ötektik mikroyapıya sahip Al-%6,4Ni alaşımında deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir.

Yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı ve Al-Cu sisteminde detaylandırıldığı gibi sonuçlar elektrik alansız ve farklı yön ve büyüklükte elektrik alan altında katılaştırılan numunelerden alınmıştır. Elektrik alansız ve elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni sistemine ait örnek görüntüler şekil 4.4 ve şekil 4.5'de gösterilmiştir.




**Şekil 4.4** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tipik mikroyapı optik görüntüsü; (a) elektrik alnsız, (b) 8 kV/cm, (c) 9 kV/cm ve (d) 10 kV/cm

Al-Cu sisteminde numunenin kendi uzunlığu boyunca λ değerlerinde kayde değer bir değişim olmadığı gösterilmişti. Dolyısıyla farklı bir mikroyapı sistemine sahip olduğundan Al-Ni sisteminde de boyuna değişimi incelemek amacıyla Al-Cu sistemindeki gibi üç ayrı mesafeden olmasa da iki farklı noktasından(numunenin tepesinden itibaren 5 ve 15mm mesafelerden) incelemeler yapılmıştır.




**Şekil 4.5** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tipik mikroyapı optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 8 kV/cm, (c) 9kV/cm ve (d) 10kV/cm

Numunelerin enine kesitlerinden üçgen metodu kullanılarak alınan çubuksal ötektik mesafe sonuçları tablo 4.3 (pozitif elektrik alan) ve tablo 4.4 (negatif elektrik alan)'da verilmiştir. Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'den de görüldüğü gibi alansız ve alanlı her bir katılaştırma kademesinde Al-%6,4Ni ötektik sisteminin boyuna incelenmesinde numunelerin mikroyapı parametrelerinin gözle görülebilir bir değişim göstermediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, Al-%6,4Ni sisteminde her bir

katılaşma aşaması için numune boyunca alınan λ ölçümlerinin ortalaması alınarak istatistiksel hatalarıyla birlikte Tablo 4.3 ve Tablo 4.4 verilmiştir.

**Tablo 4.4** Farklı büyüklükte uygulanan pozitif elektrik alan altında katılaştırılmış Al-Ni ötektik alaşımında ölçülen ötektik mesafeler

| **Pozitif statik elektrik alanı, $E_+$ (kV/cm)** | **0** | **8** | **9** | **10** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ötektik mesafeler, $\lambda_+$ (μm)** | 1.1926 | 1.4581 | 1.6801 | 2.7686 | 5 |
| | 1.1618 | 1.4215 | 1.6509 | 2.7302 | 15 |
| **Ortalama ötektik mesafe, $\lambda_{+,\text{Ortalama}}$ (μm)** | **1.1772± 0.104** | **1.4398± 0.125** | **1.6655± 0.158** | **2.7494± 0.246** | |

Sonuçlara bakıldığından Al-Cu sisteminde olduğu gibi Al-Ni sisteminde de numunelerin kendi içerisinde kayda değer bir mikroyapı değişimi olmaması numune boyunca potansiyel voltajın aynı olduğunu doğrulamaktadır.

**Tablo 4.5** Farklı büyüklükte uygulanan negatif elektrik alanaltında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımında ölçülen ötektik mesafeler

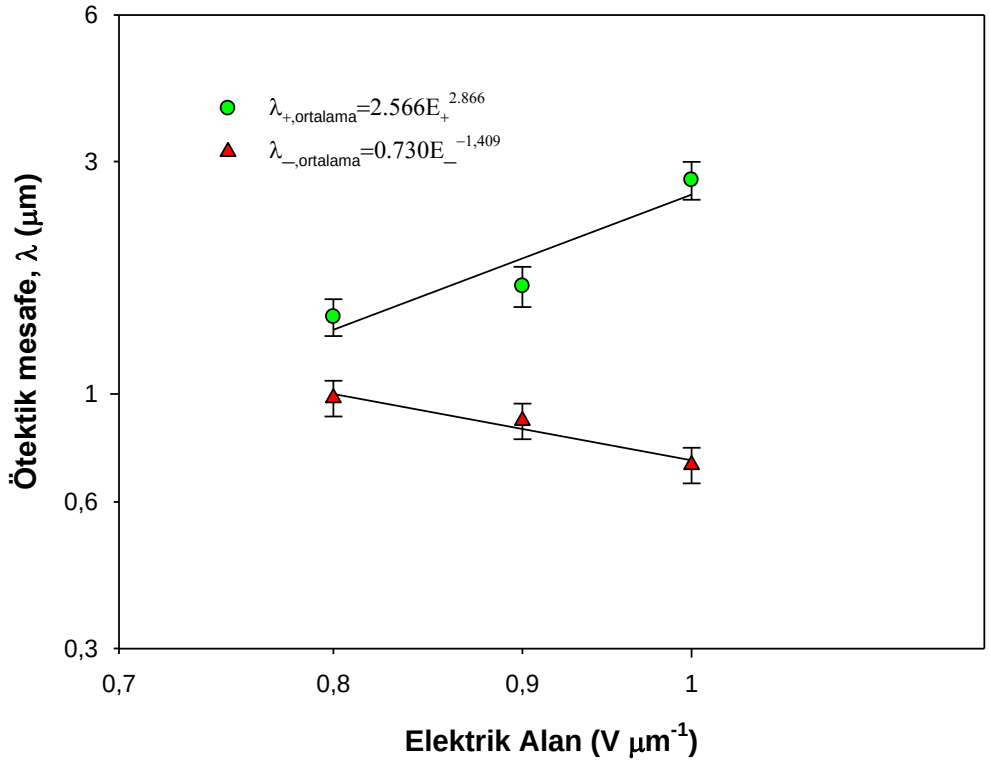
| **Negatif Statik Elektrik Alan, $E_-$ (kV/cm)** | **0** | **8** | **9** | **10** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ötektik mesafeler, $\lambda_-$ (μm)** | 1.1926 | 0.9973 | 0.8963 | 0.7284 | 5 |
| | 1.1618 | 0.9657 | 0.8661 | 0.7018 | 15 |
| **Ortalama ötektik mesafe, $\lambda_{-,\text{Average}}$ (μm)** | **1.1772± 0.104** | **0.9815± 0.083** | **0.8812± 0.074** | **0.7151± 0.060** | |

Şekil 4.4 ve tablo 4.3'e bakıldığında $\lambda_{+,\text{ortalama}}$ değerleri artan $E_+$ dğerleriyle birlikte artmıştır. Bu durum 3. Bölümde şekil 3.24 de gösterildiği ve Al-Cu sisteminde de izah

edildiği gibi uygulanan pozitif voltajla birlikte pozitif olarak yüklenen $Al^{+3}$ ve $Ni^{+}$ atomları oluşan elektrik alan yönünde bir elektrik alan kuvvetine ($F_{+}$) maruz kalırlar. Sıvı faz atomlarının katı faza akış yönünün tersine gelişen bu kuvvet sıvı atomların katı faza geçişlerini yavaşalatır yani katılaştırmayı yavaşlatmış olur.

Benzer şekilde şekil 4.5 ve tablo 4.4 'e bakıldığında $\lambda_{-,ortalama}$ değerlerinin artan $E_{-}$ değerleriyle birlikte azaldığı görülmüştür. Burda da 3. Bölümdeki şekil 3.25'de anlatılan mekanizma doğrulanmıştır. Bu kez sıvı faz atomlarının katı faza akış yönünde gerçekleşmiş olan elektrik kuvveti ($F_{-}$) sıvıdan katıya geçen atom sayısının artırmış yani atomik kütle transferini hızlandırmış yani katılaştırmayı hızlandırıcı bir etki göstermiştir.

Al-%6,4Ni sisteminde ötektik mesafenin uygulanan pozitif ve negatif elektrik alana bağlılığı çizilen grafik ve yapılan regresyon analizi ile ortaya konmuştur. İlgili grafik şekil 4.6 de verilmiştir.




**Şekil 4.6** Al-Ni ötektik alaşımında ötektik mesafenin farklı yön ve büyüklükte uygulanan durgun elektrik alana bağlı değişimi

Özetle tablo 4.3 , tablo 4.4 ve şekil 4.6'ya baktığımızda $E_+$ altında 10kV/cm değerindeki $\lambda_{+,ortalama}$ değeri elektrik alansızdaki $\lambda_{+,ortalama}$ değere nispeten 2 katından fazla bir artış göstermiştir. $\lambda_{-,ortalama}$ değerleri de 10kV/cm değerinde uygulanan $E_-$ ile birlikte neredeyse yarı yarıya azalmıştır.

Yapılan linner regresyon analizleri sonucu bulunan eşitlikler aşağıdaki gibidir:

$$\lambda_{orta.(+)}^{AlNi} = 2,566E_{+}^{2,87} \tag{4.3}$$

$$\lambda_{orta.(-)}^{AlNi} = 0,730E_{-}^{-1,41} \tag{4.4}$$

Eşitliklerden görüldüğü gibi $\lambda_{+,ortalama}$'nin $E_+$'ye üstel bağlılığı 2,87 ve $\lambda_{-,ortalama}$'nin $E_-$'ye üstel bağlılığı 1,41 civarındadır.

Al-Ni ötektik sisteminde çubuksal ötektik mesafeler üzerinden katılaştırma hızı ile elektrik alan etkisi arasında bir kıyaslama yapmak ve elektrik alan etkisini bu anlamda daha net görebilmek için literature bakıldığında Kaya ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada[101] sabit sıcaklık gradyentinde (G=4,02K/mm) yapılan ölçümlerde V=155,14µm/s, V=75,97µm/s ve V=16,27µm/s katılaştırma hızlarında ölçülen ötektik mesafe değerleri sırasıyla λ=0,8µm, λ=1,17µm ve λ=2,54µm'dir. Buna karşılık mevcut çalışmada ise bu değerlere çok yakın sırasıyla λ=0,71µm ($E_-$=10kV/cm), λ=1,17µm (elektrik alansız) ve λ=2,75µm ($E_+$=10kV/cm) değerleri bulunmuştur.

Yapılan bir başka çalışmada[102] ise ilgili değerler sabit sıcaklık gradyentinde (G=4,48K/mm) sırasıyla V=164,80µm/s, V=41,64µm/s ve V=8,25µm/s katılaştırma hızlarında mevcut çalışmaya yakın olarak çubuksal mesafeler sırasıyla λ=0,66µm, λ=1,49µm ve λ=3,52µm olarak bulunmuştur.

Bu kıyaslamalara bakıldığında mevcut çalışmada Al-Ni sisteminde her numune aynı şartlarda katılaştırılmasına rağmen uygulanan elektrik alanın literatürdeki katılaştırma hızlarına göre ne denli etkili olduğu görünmektedir. Buna göre mevcut çalışmada ölçülen $\lambda_{ort.}$ değerleri literatürdeki G=4,02K/mm sabit sıcaklık gradyenti için yaklaşık V=16,27 – 155,14µm/s ve G=4,48K/mm sabit sıcaklık gradyentinde

V=8,25-164,8 μm/s katılaştırma hızı aralığında ölçülen $\lambda_{ort.}$ değerlerine denk gelmektedir.

Al-Ni iki bileşenli ve çoklu ötektik alaşımların doğrusal katılaştırma çalışmaları ve elde edilen bağıntılardan bazıları tablo 4.6 'da verilmiştir. Tablo 4.6'dan de görülebileceği gibi yapılan doğrusal katılaştırma çalışmalarında $\lambda$ 'nın sıcaklık gradyenti veya katılaşma hızına bağlılıkları üstel olarak 0,22−0,5 aralığında tespit edilmiştir. Yaptığımız çalışmada ise $\lambda$ 'nın durgun elektriak alan değerine bağlığı üstel olarak 2,87 ile 1,41 olup düşük üstel değer (1.41) literatürde bulunan hızın üstel değerinin 3 kat daha büyüklükte aynı veya zıt yönlü olma durumunda elektrik alan kuvvetinin mikroyapı üzerine etkisinin en az doğrusal katılaştırmada etkili bir kontrol parametresi olan büyütme hızı kadar etkili bir kontrol parametresi olabileceğini göstermektedir. Yani doğrusal katılaştırma ile üretilmesi pek mümkün olamayan endüstriyel ürünlerin bu defa durgun elektrik alan altında katılaştırılmasıyal elde edilebileceği imkânını getirmektedir.

**Tablo 4.6** Al-Ni ikili veya üçlü ötektikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen ötektik mesafenin katılaşma hızına ve elektrik alana bağılığını tanımlayan bağıntıları

| **Alaşım (%ağ.)** | **G(k/mm)** | **V(μm/s)** | **Bağıntı** | **Kaynak** |
|---|---|---|---|---|
| Al-33 Cu | **-** | **-** | $\lambda_{-} = 0{,}482\ E_{-}^{-2{,}00}$<br>$\lambda_{+} = 1{,}672\ E_{+}^{2{,}77}$ | Bu çalışma |
| Al-6,4Ni | **-** | **-** | $\lambda_{-} = 0{,}730\ E_{-}^{-1{,}41}$<br>$\lambda_{+} = 2{,}566\ E_{+}^{2{,}87}$ | Bu çalışma |
| Al-12,6 Si | - | - | $\lambda_{-} = 87{,}09\ E_{-}^{-1{,}11}$<br>$\lambda_{+} = 0{,}006\ E_{+}^{2{,}56}$ | [96] |
| Al-5,7%Ni | 4,02 | 8,32-483,25 | $\lambda = 10{,}76V^{-0{,}5}$ | [101] |
| Al-6,5Ni-1,5Fe | 4,48 | 8,25-164,80 | $\lambda = 10{,}8V^{-0{,}53}$ | [102] |

Tablo 4.6'dan da görüldüğü gibi Al-Ni ötektik alaşım sistemi de $E_+$ ve $E_-$ 'nin üstel değerleri sırasıyla 1.41 ve 2.87, Al-Cu ötektik alaşımı için elde edilen üstel değerler

sırasıyla 2.00 ve 2.77 ve Al-Si ötektik alaşımın üstel değerleri ise 1,11 ve 2,87 dir. Üstel değerlerin kıyaslanması yapılırsa her üç sistem için elde edilen E+ 'nin üstel değerleri birbirine çok yakın olmasına karşın Al-Si ötektik sistemi için elde edilen E_ 'in üstel değeri, Al-Cu sistemi için elde edilen üstel değerin yaklaşık yarısı ve Al-Ni ötektik sistemi için elde edilen üstel değerden ise yaklaşık %25 daha küçük olduğu görülmektedir. Bu farkın alaşımın bileşeni ve bileşiminden ziyade mikroyapı farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Al-Si ve Al-Ni sistemindeki değerlerin Al-Cu sistmindeki değere göre daha yakın olmasının sebebi ise bu iki sistemdeki mikroyapı dağılım benzerliğinden kaynaklanabilir. Öyle ki Al-Si ve Al-Ni mikroyapıları Al-Cu ötektik sistemi gibi tabakalı ve birbirine daha bağımlı fazlardan ziyade nispeten daha serbest dağılım gösteren fazlardan oluşmaktadır.

**Farklı yön ve büyüklükte elektrik alan altında katılaştırılan Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni ötektik alaşımların λ mesafeleri değerlerini incelediğimizde;** ilgili ötektik teoriye göre[60] Jackson ve Hunt λ'nın V hızı ile ilişkisinde beklenen üstel değeri 0,5 olarak bulmuşlardır. Eşitlik (4.1),(4.2),(4.3) ve (4.4)'deki değerlere göre λ değerinin $E_+$ ve $E_-$ büyüklüklerine üstel bağlılığı (en az 1,41) V değerine bağlılığından daha etkin olduğu görünmektedir. Bu sonuçlar ise katılaşma sırasında uygulanan durgun elekrik alanın hem yönü hem de büyüklüğü, yönlü katılaşma için büyüme hızından daha etkili bir kontrol parametresi olabileceğini göstermektedir.

Al-Cu ötektik sistemi üzerine yapılan bir çalışmada[103] λ değerlerinin katılaşma hızı V'ye bağlılığı eşitlik (4.5) ile aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$\lambda = 8,6V^{-0,4} \tag{4.5}$$

Mevcut çalışma, endüstriyel üretim için de uygun bir tasarım arzusu güttüğünden katılaştırma sistemi kontrolsüz bir doğrusal katılaştırmadır. Bunun için V değerleri sistemden ölçülmemiştir. Bu bağlamda mevcut çalışmada Al-Cu ötektik sistemi için katılaştırma hızı ile elektrik alan ilişkisi hakkında fikir edinmek amacıyla eşitlik (4.1) ve eşitlik (4.2) ayrı ayrı eşitlik (4.5) ile eşitlenirse:

$$V^{AlCu} = 60,32E_+^{-6,92} \tag{4.6}$$

$$V^{AlCu} = 1347,5E_{-}^{5} \tag{4.7}$$

Eşitlikleri elde edilir. Burada Al-Cu sistemi için V değerinin pozitif ve negatif elektrik alan ile olan ilişkisi görünmektedir.

Yukarıda bahsi geçtiği gibi Jackson ve Hunt çalışmasına göre λ değerlerinin katılaşma hızı V değerine beklenen üstel bağlılığı 0,5 olduğu düşünüldüğünde Al-Cu sisteminde olduğu gibi, Al-Ni ötektik sistemi için de elektrik alanın doğrusal katılaştırmada etkili bir parametre olduğu bir kez daha kanıtlanmış olur. H. Kaya ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise Al-Ni ötektik sisteminde λ değerlerinin katılaşma hızı V ile olan ilişkisi aşağıdaki eşitlikle açıklanmıştır[101]:

$$\lambda = 10,76V^{-0,5} \tag{4.8}$$

Al-Cu sistemindekine benzer şekilde, katılaştırma hızının elektrik alan ile ilişkisi hakkında Al-Ni sisteminde fikir vermesi için eşitlik (4.3), eşitlik (4.4) ve eşitlik (4.8) birbirlerine eşitlenerek aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir:

$$V^{AlNi} = 17,65E_{+}^{-5,732} \tag{4.9}$$

$$V^{AlNi} = 217,30E_{-}^{2,818} \tag{4.10}$$

Burada eşitlik (4.6), eşitlik (4.7), eşitlik (4.9) ve eşitlik (4.10)' a bakıldığında katılaştırma hızı V artan $E_+$ değeriyle birlikte düşerken, artan E_ değeriyle birlikte artmaktadır. Yapılan çıkarımlara göre her iki yön (pozitif ve negatif) için de Al-Cu sisteminde V'nin E'ye bağlılığı Al-Ni sistemindeki bağlılıktan güçlüdür. Her iki sistemde de V'nin $E_+$'ye bağlılığı E_'ye bağlılığından daha güçlüdür. Bu durum çalışmanın ana fikri ve yukarıda verilen sonuçlarla uyum içindedir.

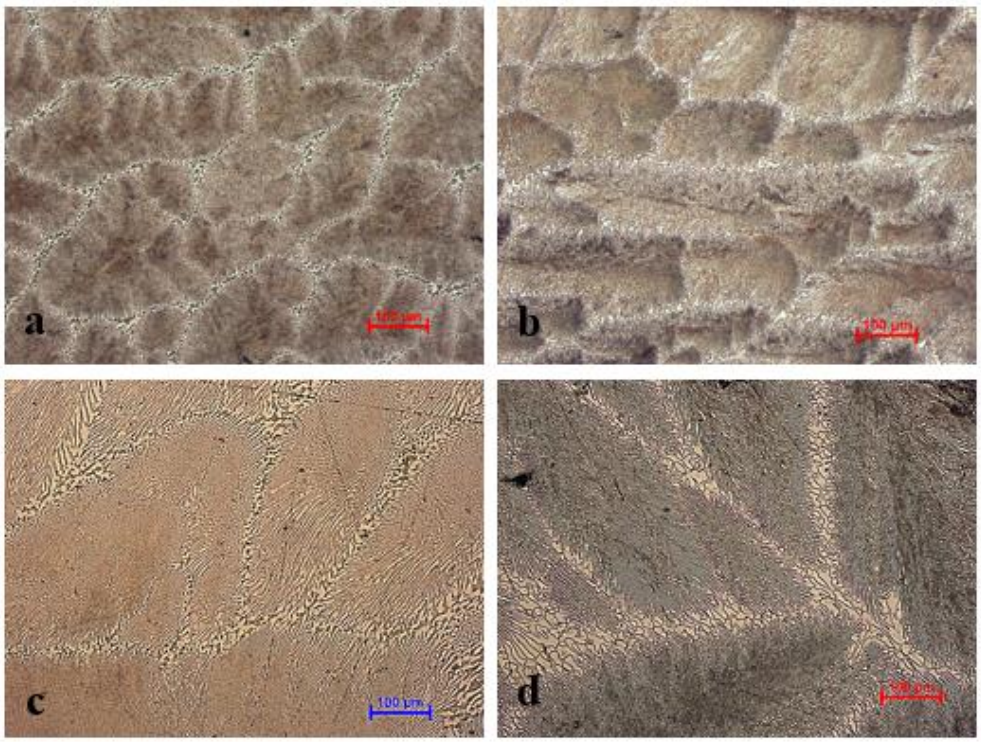
Liu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada[16] hem pozitif hem negatif elektrik alanın ötektik mesafeleri arttırdığı sonucuna varmışlardır. Ancak bu çalışmada mevcut çalışmaya benzer şekilde sıvı metal doğrudan elektrodlardan biri olarak kullanılmış olsa da uygulanan statik elektrik alanın sıvı-katı arayüzeyine paralel olarak uygulanması yönüyle mevcut çalışmadan ayrılmaktadır. Mevcut çalışmada

doğrudan sıvı-katı büyüme yönünde ve tersinde bir kuvvet söz konusu olduğundan bu farklılık çok normal ve mevcut çalışmadaki sonuçlar eleştirilerden daha uzaktır.

$E_+$ değerlerinde yapılan deneylerden elde edilen $\lambda_{ortalama}$ sonuçlarına baktığımızda Al-Ni ve Al-Cu ötektik sisteminin E'ye üstel bağlılıkları birbirine yakınken (sırasıyla 2,87 ve 2,77) E_ değerleri için elde edilen üstel bağlılıklarda Al-Ni'in E'ye üstel bağlılığı (1,41) Al-Cu sisteminin E'ye üstel bağlılığından (2,00) %30 daha küçüktür. Atomik akış mekanizmasını irdelediğimizde statik elektrik alan altında yüklenen iyonize sıvı atomları Al-Cu sistemi için $Al^{+3}$ ve $Cu^{+}$ ve Al-Ni sistemi için $Al^{+3}$ ve $Ni^{+}$ şeklindedir. Diğer yandan Cu ve Ni atomlarının kütleleri de sırasıyla 63,5 ve 58,69 g/mol'dür. Burada Cu ve Ni sıvı iyonlarının yükleri eşit ve kütleleri birbirine çok yakındır. Fakat kompozisyon oranlarına bakıldığında Cu oranı Al matrisinde Ni'den yaklaşık 5 kat daha fazladır. Bunun yanında Al-Cu ötektik alaşımının ergime derecesi Al-Ni ötektik sisteminden yaklaşık $90^0$C daha düşüktür. Sonuç olarak statik elektrik alan altında katılaştırmada atomik akış mekanizması karmaşık olmakla birlikte atomların yüklenme oranlarına, kütlelerine, sistemin bileşim oranlarına ve ergime derecelerine bağlı olduğu görülmektedir.

### 4.2.3 Al-Cu Ötektik Alaşımında Tane Boyutunun Durgun Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

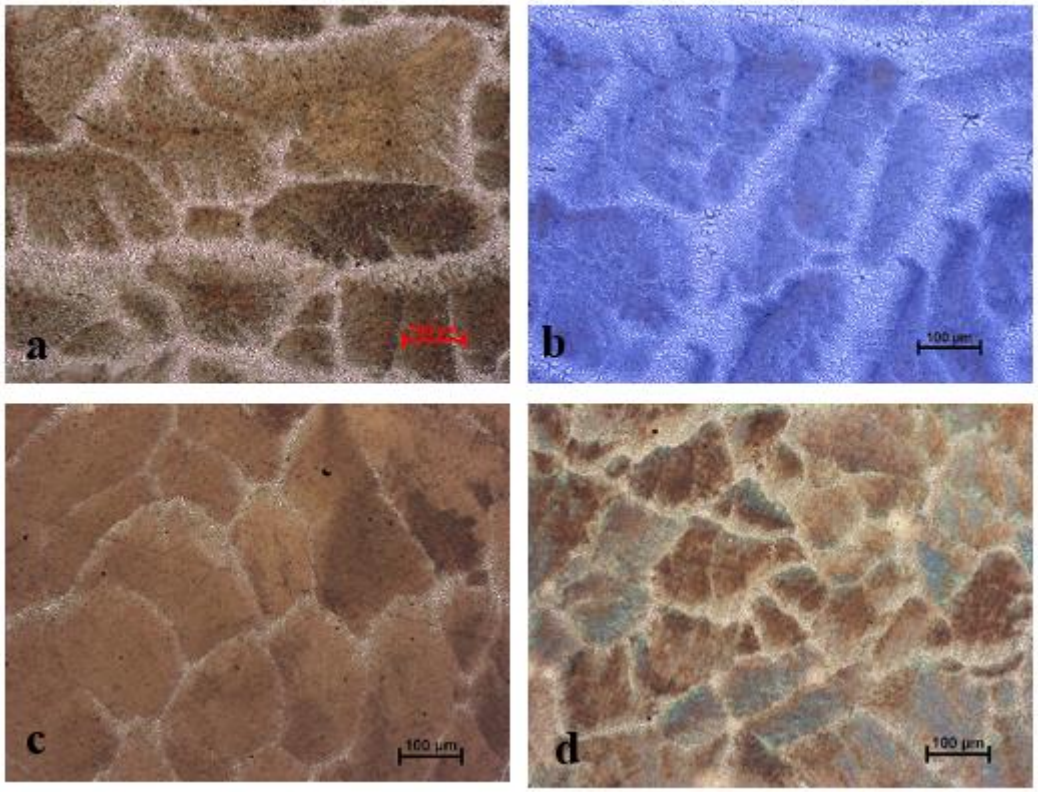
Katı-sıvı arayüzeyin büyüme yönü ve zıt yönünde farklı büyüklüklerde düzgün elektrik alan altında(ve kontrol numunesi olarak elektrik alansız) katılaştırılan Al-%33Cu alaşımlarının enine kesitlerinden doğrusal kesişim yöntemiyle ötektik tane boyutu(ÖTB) ölçümleri yapılmıştır. Farklı $E_+$ ve $E_-$ değerleri altında katılaştırılan numunelerin örnek görüntüleri sırasıyla şekil 4.7 ve şekil 4.8 de verilmiştir.




**Şekil 4.7** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tane boyutu optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 8,1 kV/cm, (c) 8,8 kV/cm ve (d) 10,0 kV/cm

ÖTB ölçümleri de ötektik mesafelerin ölçümlerinde olduğu gibi her numunenin üç farklı bölgesinden kesitler alınarak yapılmıştır. Uygulanan pozitif ve negatif elektrik alana göre yapılan ölçümler sırasıyla tablo 4.5 ve tablo 4.6'de verilmiş ÖTB ve E arasındaki ilişki şekil 4.9'deki grafik çizdirilerek ortaya konmuştur.

Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'den de görüldüğü gibi alansız ve alanlı her bir katılaştırma kademesinde Al-33%Cu ötektik sisteminin boyuna incelenmesinde numunelerin ötektik tane büyüklüklrinde (ÖTB) gözle görülebilir bir değişim göstermediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, Al-33%Cu ötektik sisteminde her bir katılaşma aşaması için numune enine alınan ÖTB ölçümlerin ortalaması alınarak istatistiksel hatalarıyla birlikte Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'de verilmiştir.




**Şekil 4.8** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tane boyutu optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 7,8 kV/cm, (c) 8,9 kV/cm ve (d) 10,2 kV/cm

**Tablo 4.7** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tane boyutu ölçümleri

| **Pozitif statik elektrik alanı, $E_+$ (kV/cm)** | **0** | **8,1** | **8,8** | **10,0** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ötektik tane boyutu, $ÖTB_+$ ($\mu m^2$)** | 25814,08 | 26998,84 | 31202,41 | 44209,35 | 5 |
| | 26729,27 | 31007,45 | 33555,78 | 34248,14 | 15 |
| | 23209,07 | 24847,46 | 25652,84 | 38894,1 | 25 |
| **Ortalama Ötektik tane boyutu, $ÖTB_{+,ortalama}$($\mu m$)** | **25250,81± 5050,16** | **27617,92± 5523,58** | **30137,01± 6027,40** | **39117,2± 7823,44** | |

**Tablo 4.8** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın tane boyutu ölçümleri

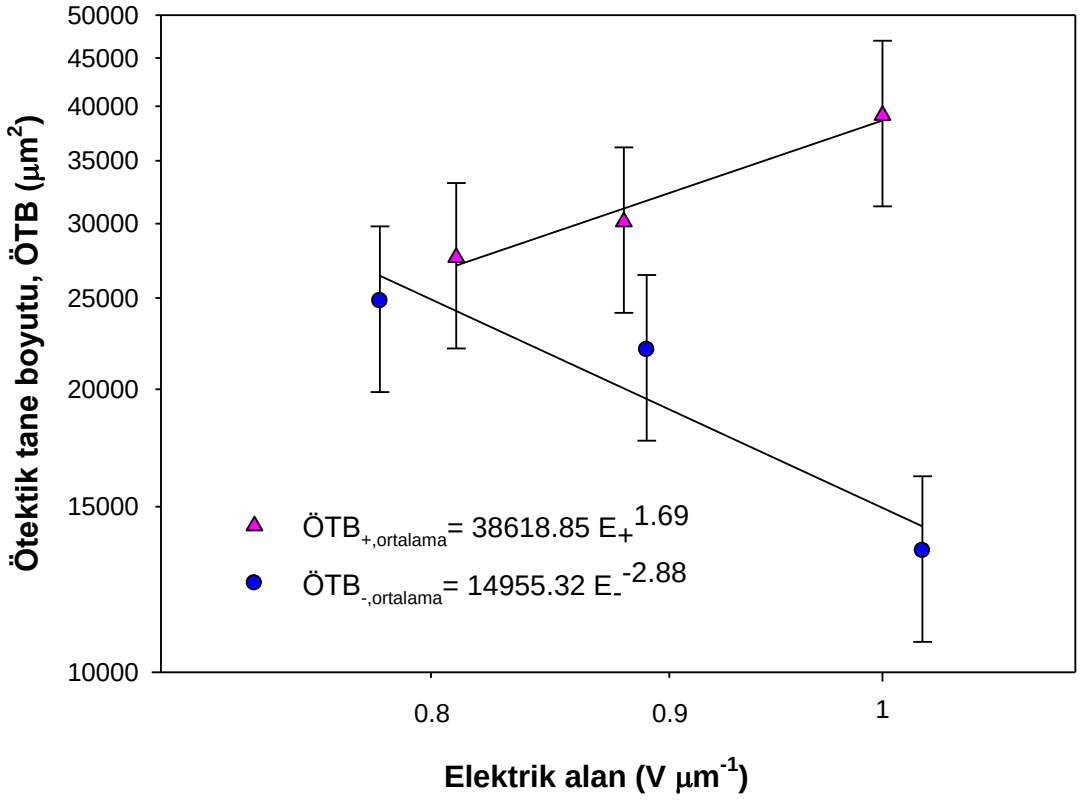
| **Negatif statik elektrik alanı, $E_-$ (kV/cm)** | **0** | **7,8** | **8,9** | **10,2** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ötektik tane boyutu, ÖTB$_-$ ($\mu m^2$)** | 25814,08 | 26713,78 | 20993,85 | 14333,82 | 5 |
| | 26729,27 | 23957,21 | 22589,55 | 13855,05 | 15 |
| | 23209,07 | 23820,54 | 22545,8 | 12208,20 | 25 |
| **Ortalama ötektik tane boyutu, ÖTB$_{-,ortalama}$ ($\mu m^2$)** | **25250,81± 5050,16** | **24830,51± 4966,10** | **22042,87± 4408,57** | **13465,49± 2693,09** | |

Yapılan ölçümler sonucu ÖTB$_{+,\ ortalama}$ ve ÖTB$_{-,ortalama}$ değerlerinin $E_+$ ve $E_-$ değerlerine bağlılığı linner regresyon analizi ile:

$$\ddot{O}TB_{orta.(+)}^{AlCu} = 38618,85E_{+}^{1,69} \tag{4.11}$$

$$\ddot{O}TB_{orta.(-)}^{AlCu} = 14955,32E_{-}^{-2,88} \tag{4.12}$$

Eşitlikleri bulunmuştur. Tablo 4.3, tablo 4.4 ve şekil 4.6'dan görüldüğü üzere ÖTB$_{+,\ ortalama}$ değeri $E_+$ değeri arttıkça artarken, ÖTB$_{-,ortalama}$ değeri $E_-$ değeri arttıkça azalmıştır. Analizlerden görüleceği üzere Al-%33Cu alaşımı için ötektik tane boyutlarının $E_+$'ye bağlı üstel değeri 1,69 iken $E_-$'ye bağlı değeri ise neredeyse iki katı olan 2,66 değerindedir. Bu durum Al-Cu ötektik sistemi için ÖTB$_{ortalama}$'nın $E_-$'ye bağlılığı, $E_+$'ye bağlılığından daha güçlü olduğu anlamına gelir.

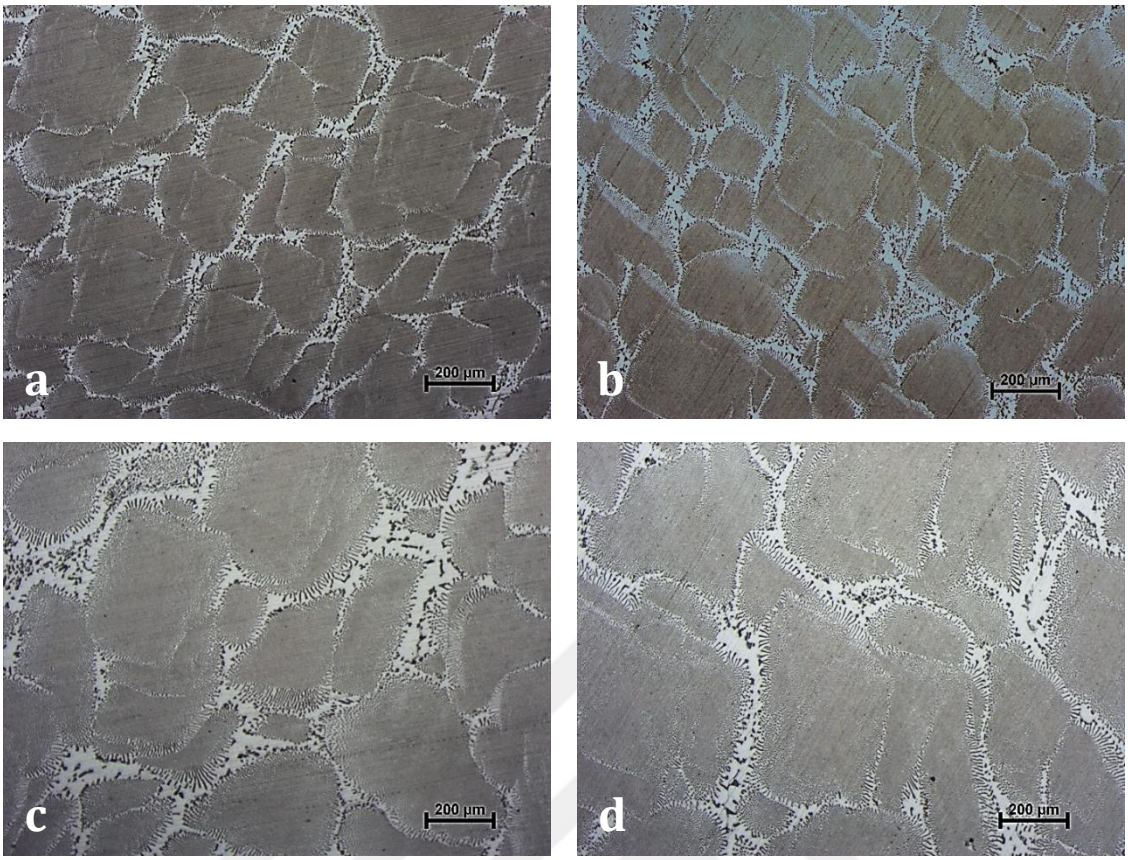



**Şekil 4.9** Al-Cu alaşımında ötektik tane boyutunun durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi

### 4.2.4 Al-Ni Ötektik Alaşımında Ötektik Tane Boyutunun Elektrik Alan Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

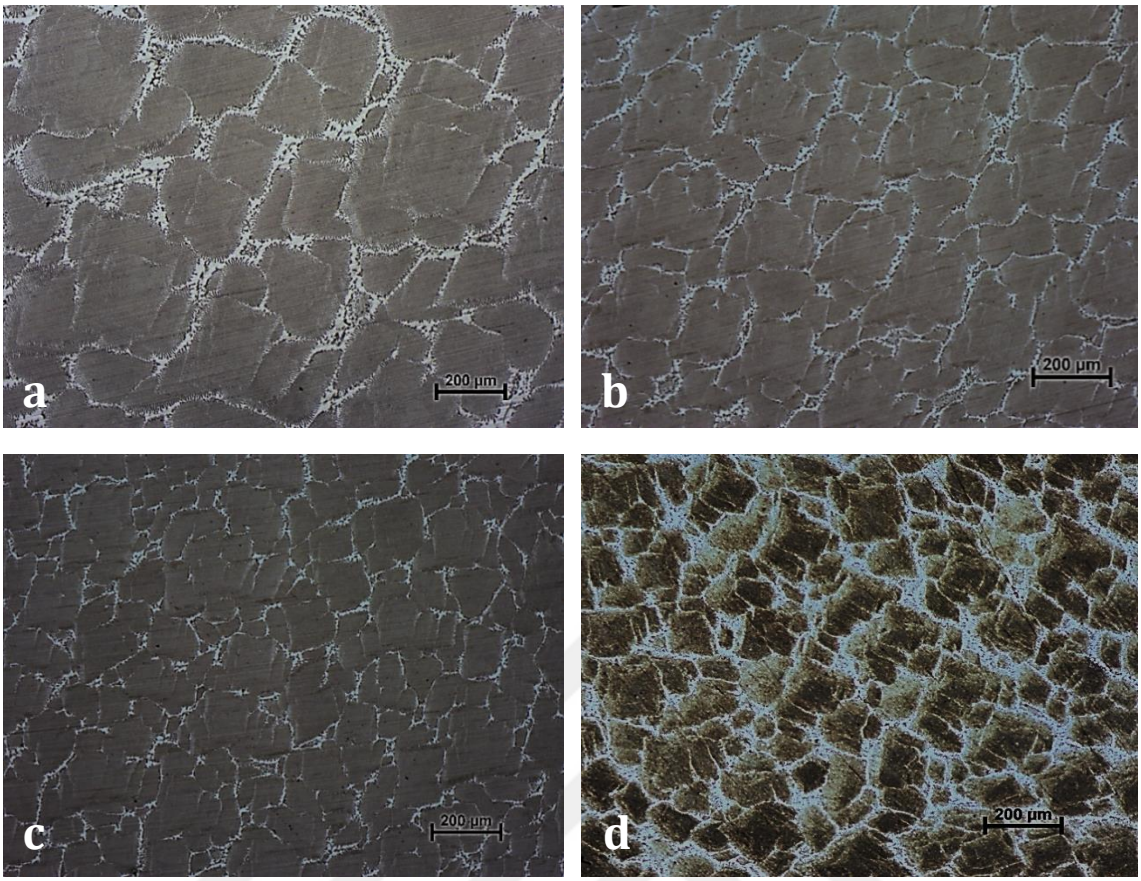
Katı-sıvı arayüzeyin büyüme yönü ve zıt yönünde farklı büyüklüklerde düzgün elektrik alan altında(ve kontrol numunesi olarak elektrik alansız) katılaştırılan numnlerden hassas bir kesme ve özenli metalografik işlemlerden sonra ortaya konan Al-6,4%Ni ötektik sisteminin örnek tane boyutu resimleri şekil 4.10 ve şekil 4.11 de verilmiştir.

Şekil 4.10 pozitif elektrik alan altında, şekil 4.11 ise negatif elektrik alan altında katılaştrılan numunelerin örnek görüntüleridir.




**Şekil 4.10** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tane boyutu optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 8 kV/cm, (c) 9 kV/cm, (d) 10 kV/cm

Şekil 4.10'da belirtilen görsellerde sırasıyla a elektrik alansız olup b'den d'ye pozitif elektrik alanın artarak uygulandığı (sırasıyla 8kV/cm, 9Kv/cm, 10kV/cm) tane boyutlarını gösteren görsellerdir. Yine şekil 4.11'de a görseli elektrik alansız aynı şartlarda katılaştırılan numune olup b'den d'ye negatif elektrik alanın artarak uygulandığı (sırasıyla 8kV/cm, 9Kv/cm, 10kV/cm) görselleri temsil eder.




**Şekil 4.11** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tane boyutu optik görüntüsü; (a) elektrik alansız, (b) 8 kV/cm, (c) 9 kV/cm, (d) 10 kV/cm

Ötektik mesafe ölçümlerinde yapıldığı gibi burda da her numuneden iki adet enine kesit alınarak ÖTB değerleri ölçülmüştür. $E_+$ ve $E_-$ dğerleri altında katılaştırılan numunelerin ÖTB değerleri sırasıyla tablo 4.7 ve tablo 4.8'de verilmiştir.

$ÖTB_{ortalama}$ ve $E_+$ ve $E_-$'ye bağlılığını görmek için şekil 4.12'deki grafik çizdirilmiş ve lineer regresyon analizi yapılmıştır. Lineer regresyon analizi sonrası elde edilen eşitlikler eşitlik (4.13) ve eşitlik (4.14) de verilmiştir.

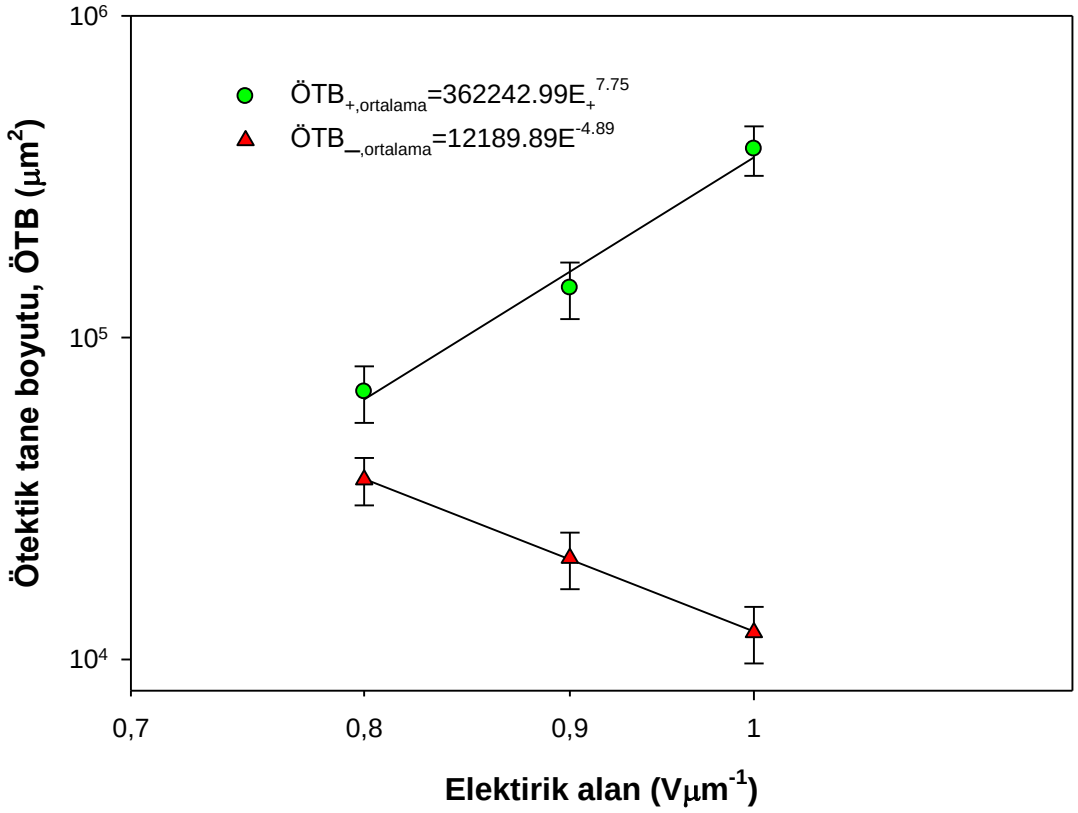
**Tablo 4.9** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tane boyutu ölçümleri

| **Pozitif durgun elektrik alan, $E_+$ (kV/cm)** | **0** | **8** | **9** | **10** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ötektik tane boyutu, $ÖTB_+$ ($\mu m^2$)** | 59952,65 | 69375,55 | 157406,23 | 395712,40 | 5 |
| | 57496,55 | 66399.55 | 127924.17 | 375973,20 | 15 |
| **Ortalama ötektik tane boyutu, $ÖTB_{+,Ortalama}$ ($\mu m^2$)** | **58724.60± 11744,9** | **67887.55± 13577,5** | **142665.20± 28533** | **385842.80± 67706,1** | |

**Tablo 4.10** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın tane boyutu ölçümleri

| **Negatif durgun elektrik alan, $E_-$ (kV/cm)** | **0** | **8** | **9** | **10** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ötektik tane boyutu, $ÖTB_-$ ($\mu m^2$)** | 59952,65 | 37345,47 | 21624,51 | 12791,09 | 5 |
| | 57496,55 | 35039,43 | 19682,05 | 11486,85 | 15 |
| **Ortalama ötektik tane boyutu, $ÖTB_{-,Ortalama}$ ($\mu m^2$)** | **58724.60± 11744,9** | **36192,45± 6084,9** | **20653,28± 4130,66** | **12138,97± 2427,8** | |

Şekil 4.12 , tablo 4.7 ve tablo 4.8'den görüldüğü üzere $ÖTB_{+,ortalama}$ değerleri artan $E_+$ ile birlikte artarken, $ÖTB_{-,ortalama}$ değerleri artan $E_-$ değerleriyle birlikte düşmüştür. Yani Al-Cu sisteminde olduğu şekilde pozitif elektrik alan altında katılaştırılan taneler büyümüş, negatif elektrik alan altında katılaştırılan taneler ise küçülmüştür. Bu da yukarıda izahı yapılan atomik kütle transferini yavaşlatma ya da hızlandırma mekanizmasını Al-Ni sisteminde de doğrulamaktadır.




**Şekil 4.12** Al-Ni alaşımında ötektik tane boyutunun durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi

Lineer regresyon analizi sonrası elde edilen eşitliklere bakarsak:

$$\dot{O}TB_{orta.(+)}^{AlNi} = 362242,99E_{+}^{7,75} \tag{4.13}$$

$$\dot{O}TB_{orta.(-)}^{AlNi} = 121,89E_{-}^{-4,89} \tag{4.14}$$

Şekilnde bulunmuştur.

Eşitlik 4.13 ve eşitlik 4.14'ye bakıldığında; $ÖTB_{+,ortalama}$'nin $E_+$'ye üstel bağlılığı 7,75 olarak, $ÖTB_{-,ortalama}$ değerlerinin $E_-$'ye üstel bağlılığı ise 4,89 olarak bulunmuştur. $ÖTB_{+,ortalama}$'nin $E_+$'ye üstel bağlılığı, $ÖTB_{-,ortalama}$ değerlerinin $E_-$'ye üstel bağlılığından %60 civarı daha güçlüdür.

- **Farklı yön ve büyüklükteki durgun elektrik alan altında katılaştırılan Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni alaşımlarının ötektik tane boyutlarına baktığımızda;** elektrik alanın $\lambda$ değerlerini etkilediği gibi ÖTB değerlerini etkilediği net bir şekilde görünmektedir. Katılaştırma sırsında durgun elektrik alan uygulanan bir başka çalışmada[16] Al-Cu ötektik sisteminde hem negatif elektrik alanın hem de pozitif elektrik alanın sistemdeki tane sayısını azalttığını rapor etmişlerdir. Yani uygulanan pozitif ve negatif elektrik alan tane boyutlarını büyütmüştür. Söz konusu çalışmada uygulanan elektrik alan sıvı-katı arayüzeyine paralel olduğundan tek yönlü bir etki gözlenmesi normal kabul edilebilir. Ancak mevcut çalışmada katılaşma yönünde ve katılaşma yönüne ters bir elektrik alan ve elektrik alan kuvveti söz konusudur bu yönüyle mevcut çalışmada $E_+$ değerleriyle birlikte ötektik tane boyutları iki alaşım sistem için artmış, E_ değerleriyle birlikte ise ötektik tane boyutları her iki alaşım sistemi için de net bir şekilde azalma göstermiştir.

Literatürde durgun elektrik alan üzerine çalışma sayısının çok kısıtlı olmasıyla birlikte tane ve mikroyapı inceltme üzerine yapılan çalışmalara baktığımızda, araştırmacılar[104]–[107] Al ve alaşımlarında elektrik akım pulsu ile bu konuda başarı elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Zaidat ve arkadaşları[108] Al-Ni alaşımı üzerine magnetik alan (travelling magnetic field) uygulaması ile bu yöntemin mikroyapı inceltmede etkili olduğunu sunmuşlardır. Her ne kadar bu çalışmalar mevcut çalışmadaki yöntemden farklı olsalar da dışsal fiziksel etkinin (external physical field) metalik malzemelerde iç yapı kontrolü için kullanılabilceğini göstermeleri yönüyle değerlidir.

Bu çalışmaların tamamı, dışsal fiziksel etkinin mikroyapı inceltme üzerine odaklanmış çalışmalardır. Fakat mevcut çalışmada uygulanan farklı yöndeki elektrik alan ile tane inceltme dışında kütle akış hızının düşürülerek katılaşmayı yavaşlatıcı etkiyle birlikte tane büyümesi de sağlanmıştır. Bu şekilde dışsal bir fiziksel alanın tane büyütmede de etkili olduğunu göstermesi yönüyle mevcut çalışma çok önemlidir.

## 4.3 Al-%33Cu ve Al-%6,4Ni Alaşım Sistemlerinde Sertlik ve Çekme Dayanım Özelliklerin Durgun Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

### 4.3.1 Al-Cu Ötektik Alaşımında Sertlik Değerlerinin Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

Deneysel sistem ve yöntem bölümünde anlatıldığı gibi sertlik deneyleri standartlara uygun bir şekilde Brinell yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Al-%33Cu ötektik alaşımın farklı yön ve büyüklükte durgun elektrik alan altında katılaştırılan numunelerden ölçülen sertlik değerleri tablo 4.9 ve tablo 4.10'da verilmştir. Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'den de görüldüğü gibi alansız ve alanlı her bir katılaştırma kademesinde Al-33%Cu ötektik sisteminin boyuna incelenmesinde numunelerin setliklerinin (HB) gözle görülebilir bir değişim göstermediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, Al-33%Cu ötektik sisteminde her bir katılaşma aşaması için numune boyuna alınan HB ölçümlerin ortalaması alınarak ölçüm hatalarıyla birlikte Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da verilmiştir.

**Tablo 4.11** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın sertlik ölçümleri

| **Pozitif statik elektrik alanı, $E_+$ (kV/cm)** | **0** | **8,1** | **8,8** | **10,0** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Brinell sertlik, $HB_+$ (kg/mm$^2$)** | 160,46 | 158,99 | 154,846 | 116,792 | 5 |
| | 159.48 | 158.43 | 157,922 | 137,32 | 15 |
| | 163,97 | 160,91 | 159,23 | 139,778 | 25 |
| **Ortalama Brinell sertlik, $HB_{+,Ortalama}$ (kg/mm$^2$)** | **161,30± 6,45** | **159,44± 6,38** | **157,33± 6,29** | **131,29± 5,25** | |

**Tablo 4.12** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın sertlik ölçümleri

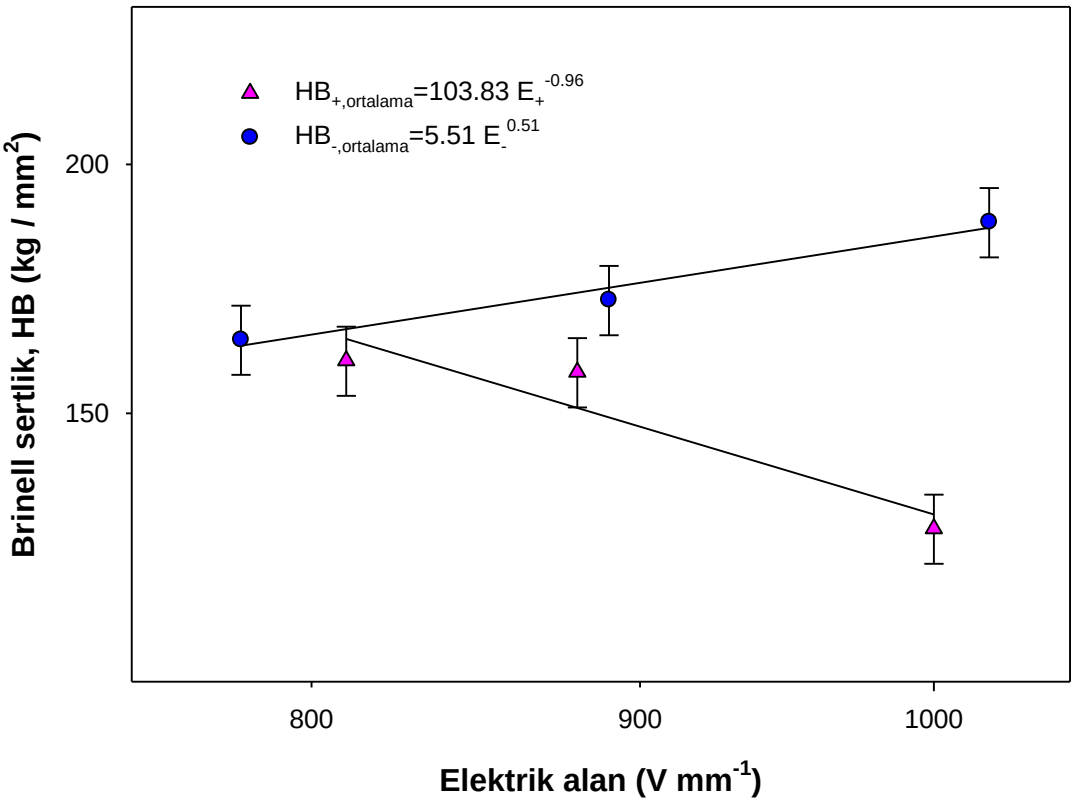
| **Negatif statik elektrik alanı, $E_-$ (kV/cm)** | **0** | **7,8** | **8,9** | **10,2** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Brinell sertlik, $HB_-$ (kg/mm2)** | 160,46 | 162,45 | 169,424 | 182,47 | 5 |
| | 159,48 | 163,43 | 167,886 | 184,638 | 15 |
| | 163,97 | 164,14 | 175,764 | 194,322 | 25 |
| **Ortalama Brinell sertlik, $HB_{-,Ortalama}$ ($kg/mm^2$)** | **161,30± 6,45** | **163,34± 6,53** | **171,02± 6,84** | **187,14± 7,49** | |

Bu değerlerden yola çıkarak $HB_{ortalama}$'nın $E_+$ ve $E_-$ değerlerine bağlılığını görmek amacıyla şekil 4.13 deki grafik çizdirilmiş ve lineer regresyon analizi uygulanmıştır. $HB_{ortalama}$ ortalama sertlik değerlerinin $E_+$ ve $E_-$ değerlerine bağlılığını gösteren lineer regresyon analizi sonuçları eşitlik (4.15) ve eşitlik (4.16) de verilmiştir:

$$HB_{orta.(+)}^{AlCu} = 103,83E_{+}^{-0,96} \tag{4.15}$$

$$HB_{orta.(-)}^{AlCu} = 5,51E_{-}^{0,51} \tag{4.16}$$

Yapılan ölçüm ve analizlerden görüldüğü üzere $HB_{+,ortalama}$ değeri, $E_+$ değeri arttıkça azalmış ve $HB_{-,ortalama}$ değeri $E_-$ değeri arttıkça artmışır. Eşitlik (4.15) ve eşitlik (4.16)'e baktığımızda $HB_{ortalama}$ değerlerinin $E_+$'ye üstel bağlılığı 0,96 ve $E_-$'ye üstel bağlılığı 0,51 olarak bulunmuştur. Yani Al-Cu ötektik sisteminde sertlik değerlerinin pozitif elektrik alana bağlılığı negatif eletrik alana bağlılığına göre iki kat daha güçlüdür.




**Şekil 4.13** Al-Cu ötektik alaşımında sertlik değerlerinin durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi

### 4.3.2 Al-Ni Ötektik Alaşımında Sertliğin Elektrik Alan Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

Farklı yön ve büyüklükte katılaştırılan numunelerin akredite laboratuarlarda yapılan Brinell sertlik ölçümü sonuçları tablo 4.11 ve tablo 4.12 de verilmiştir. Tablo 4.11 ve Tablo 4.12'den de görüldüğü gibi alansız ve alanlı her bir katılaştırma kademesinde Al-6,4%Ni sisteminin boyuna incelenmesinde numunelerin setliklerinin (HB) gözle görülebilir bir değişim göstermediği tespit edilmiştir.

**Tablo 4.13** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın sertlik ölçümleri

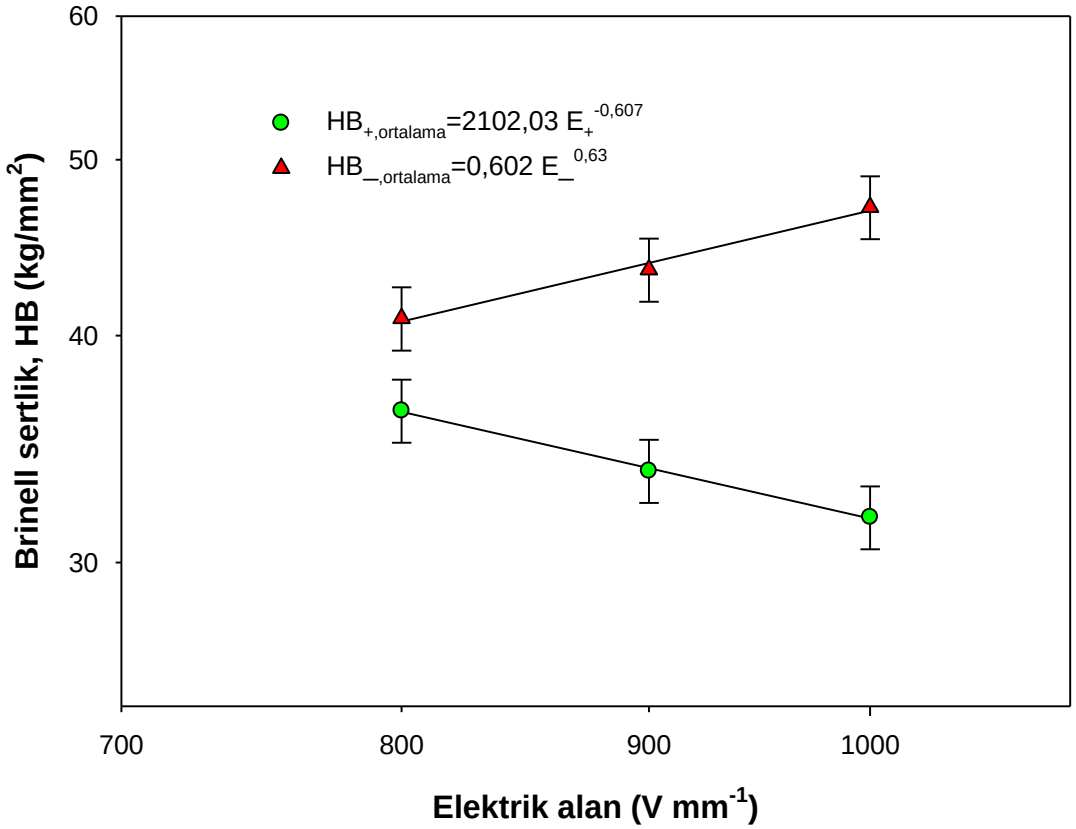
| **Pozitif durgun elektrik alan, $E_+$ (kV/cm)** | **0** | **8** | **9** | **10** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Brinell sertlik, $HB_+$ (kg/mm$^2$)** | 38,327 | 36,829 | 34,100 | 32,021 | 5 |
| | 37,701 | 35,925 | 33,304 | 31,527 | 15 |
| **Ortalama Brinell sertlik, $HB_{+,\,Ortalama}$ (kg/mm$^2$)** | 38,014±1,520 | 36,377±1,455 | 33,702±1,348 | 31,774±1,270 | |

Dolayısıyla, Al-6,4%Ni ötektik sisteminde her bir katılaşma aşaması için numune boyunca alınan HB ölçümlerin ortalaması alınarak ölçüm hatalarıyla birlikte Tablo 4.11 ve Tablo 4.12'de verilmiştir.

**Tablo 4.14** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın sertlik ölçümleri

| **Negatif durgun elektrik alan, $E_-$ (kV/cm)** | **0** | **8** | **9** | **10** | **Numunenin üst kısmına olan uzaklık (mm)** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Brinell sertlik, $HB_-$ (kg/mm$^2$)** | 38,327 | 41,391 | 43,695 | 47,413 | 5 |
| | 37,701 | 40,387 | 43,301 | 46,763 | 15 |
| **Ortalama Brinell sertlik, $HB_{-,Ortalama}$ (kg/mm$^2$)** | **38,014±1,52** | **40,889±1,64** | **43,498±1,74** | **47,088±1,88** | |

HB'nin $E_+$ ve $E_-$ değerlerine bağlılığını ortaya koymak adına şekil 4.14'de gösterilen grafik çizdirilmiş ve lineer regresyon analizi uygulanmıştır.




**Şekil 4.14** Al-Ni ötektik alaşımında sertlik değerlerinin durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi

Regresyon analizi sonucu elde edilen eşitlikler aşağıdaki gibidir:

$$HB_{orta.(+)}^{AlNi} = 2102,03E_{+}^{-0,607} \tag{4.17}$$

$$HB_{orta.(-)}^{AlNi} = 0,602\,E_{-}^{0,63} \tag{4.18}$$

Burada eşitlik (4.17) ve eşitlik (4.18) e bakıldığında; $HB_{+,ortalama}$ ve $HB_{-,ortalama}$ değerlerinin $E_+$ ve $E_-$'ye üstel bağlılıkları sırasıyla 0,61 ve 0,63 olarak birbirine yakın bulunmuştur. Al-%6,4Ni ötektik sisteminde şekil 4.14, tablo 4.11 ve tablo 4.12 dan görüleceği üzere beklendiği gibi $HB_{+,ortalama}$ değerleri $E_+$ değeri arttıkça azalmış ve $HB_{-,ortalama}$ değerleri $E_-$ değeri ile beraber yükselmiştir.

- **Farklı yön ve büyüklükte durgun elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ve Al-Ni ötektik sistemlerde sertlik değerlerine baktığımızda**; malzeme biliminde sertlik(dayanım) plastik şekil değiştirmeye karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır. Metallerin plastik şekil değişimi ise dislokasyon adı verilen çizgisel kusurların kristal içerisindeki hareketiyle ilgilidir. Dislokasyon hareketini zorlaştırıcı veya engelleyici her türlü etken malzeme dayanımını artırıcı rol oynar. Tane büyüklüğü ile metallerin sertlikleri arasında doğrudan bir ilişki söz konusudur. Tane boyutu azaldıkça genellikle sertlik artar. Tane sınırları deformasyon sırasında dislokasyon hareketini engellediğinden ince taneli malzemenin sertliği kaba taneli malzemeye göre artar.

Alınan sonuçlara göre yukarıdaki temel bilgi kıyaslandığında mikroyapıdaki (ötektik mesafeler ve tane boyutları) değişimlere göre sertlik değişimlerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Bu değerler yukarıda anlatılan $E_+$ ve $E_-$ altında katılaştırma mekanizmalarına göre mikroyapıda meydana gelen değişmin sonucu olarak sertliklerin etkilenmesini her iki alaşım sistemi de doğrulamaktadır. Uygulanan çift yönlü yüksek durgun elektrik alan malzemenin mikroyapı özellikleriyle birlikte önemli bir mekanik özellik olan sertlik değerlerini de çift yönlü olarak etkilemiştir.

Sertlik-elektrik alan-katılaştırma hızı kıyaslaması için literatür çalışmalarına baktığımızda; Al-Cu ötektik sistemi için Bayram ve Maraşlı'nın yaptığı çalışmada[95] mevcut çalışmadaki $E_+=10$, $E=0$ ve $E_-=10$, değerlerinde elde edilmiş olan sırasıyla 131,29kg/mm$^2$, 161,3kg/mm$^2$ ve 187,14 kg/mm$^2$ sertlik değerlerine nispeten 138,15 kg/mm$^2$, 161,55 kg/mm$^2$ ve 186,46 kg/mm$^2$ sertlik değerlerine sırasıyla V=9,25µm/s, 94,35µm/s ve 1024,45µm/s çekme hızlarında ulaşılmıştır. Yine Al-Cu sistemi için yapılan bir başka üçlü ötektik çalışmada[109] mevcut çalışmadaki sertlik değerlerine yakın olan bazı değerler (164,7kg/mm$^2$, 177 kg/mm$^2$, 183kg/mm$^2$) V=8,4µm/s – 166,2µm/s aralığındaki katılaştırma hızlarında elde edilmiştir.

Al-Ni ötektik sistemi için sertlik-elektrik alan-katılaştırma hızı kıyaslamasına baktığımızda; Kaya ve arkadaşlarının[110] yaptığı çalışmada mevcut çalışmadaki sertlik değerlerine yakın olarak bulunan 41,24kg/mm$^2$, 45,18kg/mm$^2$, 48,73kg/mm$^2$ ve 50,76 kg/mm$^2$ sertlik değerleri sırasıyla V=8,32µm/s, 16,27µm/s,

41,4μm/s ve 75,97μm/s katılaştırma hızları aralığında ölçülmüştür. Yapılan kıyaslamaya bakıldığında; her iki alaşım sistemi için de, farklı yön ve büyüklükte ugulanan elektrik alan ($E_+$=10kV/cm den E_=10kV/cm'ye kadar) üzerinden elde edilen sertlik değerleri, literatürdeki çalışmalarda geniş bir katılaştırma hızı aralığında elde edilen sertlik değerlerine denk geldiği ortaya konmuştur. Bu durum, elektrik alanın katılaştırma sistemlerinde en az V katılaştırma hızı parametresi kadar etkili bir parametre olduğunu mikroyapı analizlerinden sonra sertlik değerleri üzerinden de göstermesi yönüyle önemlidir.

Yukarda literatürdeki Al-Cu ve Al-Ni ikili veya çoklu sistemlerinde ötektik mesafenin hıza bağımlılığını belirtilen tablolara benzer şekilde literatürdeki ikili veya çoklu Al-Cu ve Al-Ni sistemlerinde sertliklerin büyütme hızına bağlılık tabloları yapılacak üstel değerlerin kıyaslamının yapılmasında fayda vardır.

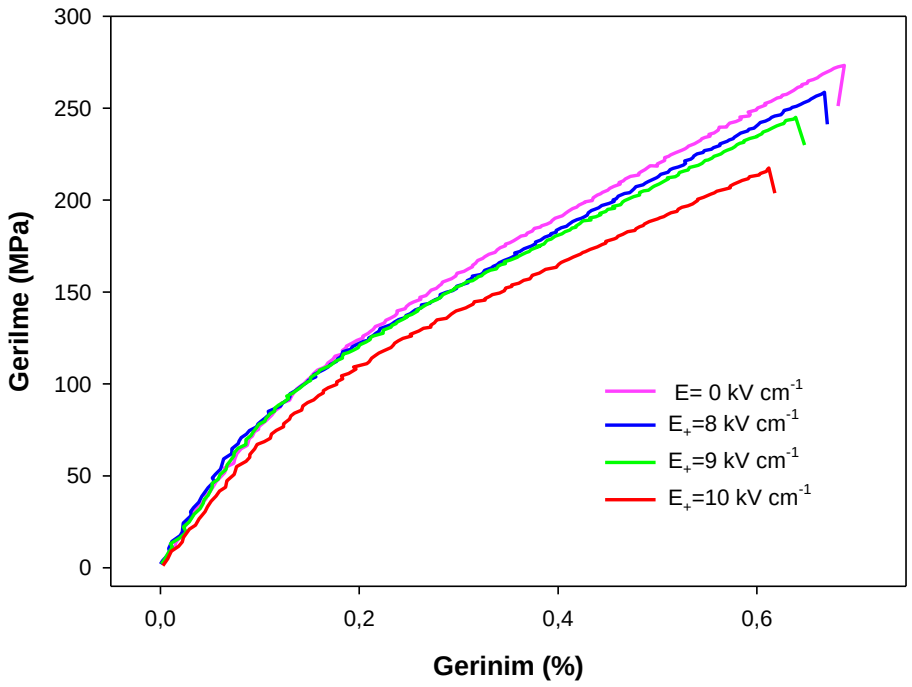
**Tablo 4.15** Al-Cu ve Al-Ni ikili veya üçlü ötektikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen mikrosertliğin katılaştırma hızına ve uygulanan alana bağılığını tanımlayan bağıntıları

| **Alaşım (%ağ.)** | **Bağıntı** | **Kaynak** |
|---|---|---|
| Al-33 Cu | $HB_+ = 103{,}83\ E_+^{-0{,}96}$<br>$HB_- = 5{,}51\ E_-^{0{,}51}$ | Bu çalışma |
| Al-6,4 Ni | $HB_+ = 2102{,}03\ E_+^{-0{,}607}$<br>$HB_- = 0{,}602\ E_-^{0{,}63}$ | Bu çalışma |
| Al-12,6 Si | $HB_+ = 91{,}20\ E_+^{-0{,}16}$<br>$HB_- = 25{,}11\ E_-^{0{,}32}$ | [96] |
| Al-32,5%Cu-1%Ni | $HV = 119{,}59\ V^{0{,}07}$ | [95] |
| Al-33Cu-0.1Ti | $HV = 149{,}15\ V^{0{,}05}$ | [97] |
| Al-30Cu-6Mg | $HV = 308{,}3\ V^{0{,}03}$ | [98] |
| Al-28Cu-6Si-2,2Mg | $HV = 237{,}68\ V^{0{,}043}$ | [99] |
| Al-26Cu-6,5Si-0,5Fe | $HV = 156{,}5\ V^{0{,}09}$ | [100] |
| Al-6,5Ni-1,5Fe | $HV = 42{,}54\ V^{0{,}07}$ | [102] |
| Al-5,7Ni | $HV = 66{,}13\ V^{0{,}10}$ | [110] |
| Al-11,1Si-4,2Ni | $HV = 72{,}44\ V^{0{,}08}$ | [111] |

Tablo 4.15'e baktığımızda Al-Cu ötektik alaşım sistemi de $E_-$ ve $E_+$ 'nin üstel değerleri sırasıyla 0,96 ve 0,51, Al-Ni sistemi için 0,607 ve 0,63, Al-Si sistemi için 0,16 ve 0,32 olarak bulunmuştur. Sertlik değerlerinin elektrik alana bağlılığı kıyaslandığında yukarıda mikroyapı üzerinden de değerlendirildiği gibi tutarlı şekilde Al-Si ötektik sisteminin bağlılığı Al-Cu ve Al-Ni sisteminden düşük bulunmuştur. Literatürde diğer Al-Cu ve Al-Ni ikili ve çoklu ötektik sistemleri için yapılan sertliklerin büyütme hızına bağlılığında ise en yüksel üstel değer 0,1 olarak ölçülmüştür.

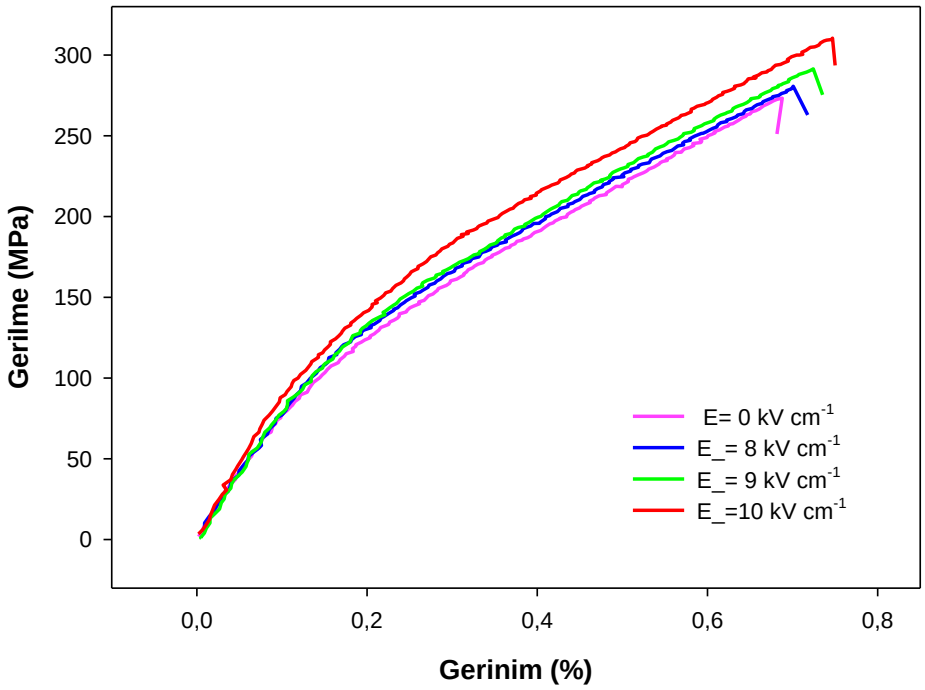
### 4.3.3 Al-Cu Ötektik Alaşımında Çekme Mukavemetinin Elektrik Alanın Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

Al-%33Cu ötektik alaşımında sertlik değerlerinden sonra yine önemli bir mekanik davranış özelliği olan çekme deneyleri akredite laboratuarlarda uzman eşliğince yapılmıştır.




**Şekil 4.15** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın gerilme-gerinim eğrileri

Farklı yön ve büyüklükte elektrik alan altında katılaştırılan numunelerin gerilme-gerinim eğrileri şekil 4.15 ve şekil 4.16'da verilmiştir.



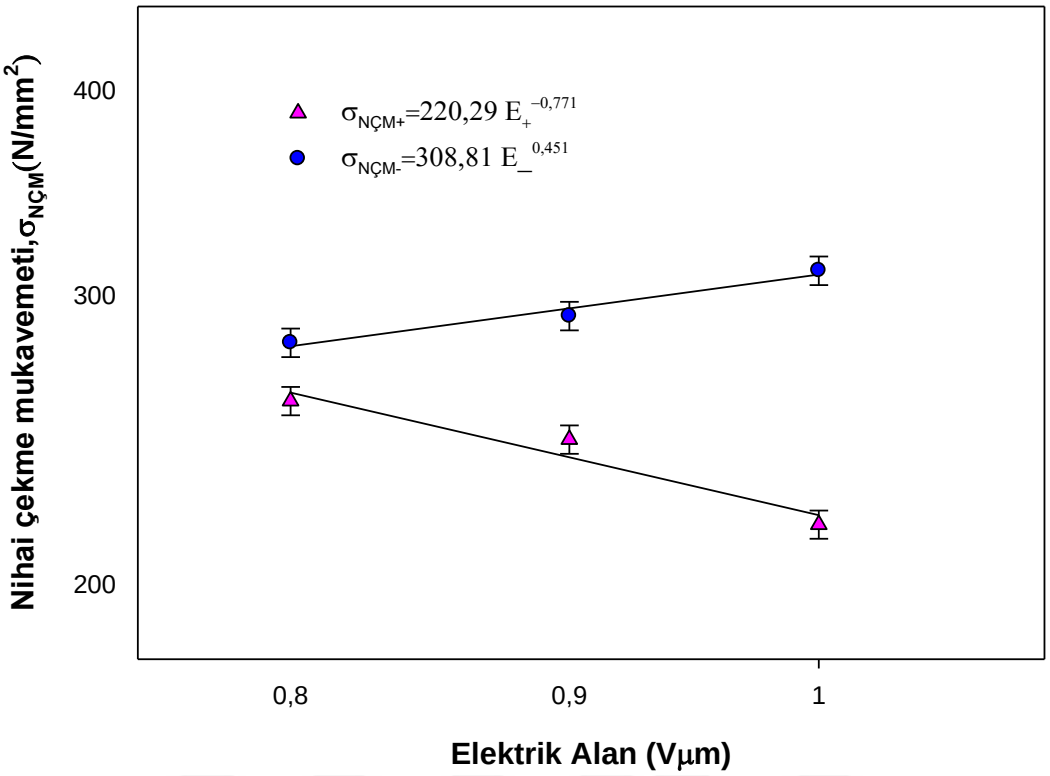

**Şekil 4.16** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik alaşımın gerilme-gerinim eğrileri

Deneylerden elde edilen nihai çekme mukavemetleri (NÇM) tablo 4.13'de verilmiştir.

**Tablo 4.16** Farklı yön ve büyüklükte uygulanan elektrik alan altında katılaştırılan Al-Cu ötektik numunelerin nihai çekme mukavemetleri

| **Uygulanan elektrik alan büyüklüğü, E(kV/cm)** | **0** | **8** | **9** | **10** |
|---|---|---|---|---|
| **Nihai çekme mukavemeti($E_+$), $\sigma_{NÇM+}$ ($N/mm^2$)** | 273.24±5.46 | 258,61±5,17 | 245,00±4,90 | 217,42±4,30 |
| **Nihai çekme mukavemeti($E_-$), $\sigma_{NÇM-}$ ($N/mm^2$)** | 273.24±5.46 | 280,66±5,61 | 291,39±5,82 | 310,57±6,21 |

$\sigma_{NÇM}$ ve E'ye bağlı olarak nasıl değiştiğini görmek için şekil 4.17'deki grafik çizdirilmiş ve $\sigma_{NÇM}$ ile E arasındaki ilişkiyi kurmak için lineer regresyon analizi yapılmıştır.




**Şekil 4.17** Al-Cu ötektik alaşımında nihai çekme mukavemeti değerlerinin durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi

Şekil 4.17 ve tablo 4.13'den görüldüğü üzere $\sigma_{NÇM+}$, değerleri $E_+$ değeri ile birlikte düşerken $\sigma_{NÇM-}$, değerleri uygulanan $E_-$ değeri ile birlikte yükselmiştir. Lineer regresyon analizi sonucu $\sigma_{NÇM}$ nin $E_+$ ve $E_-$ ile ilişkisi eşitlik (4.19) ve eşitlik (4.20) da verilmiştir.

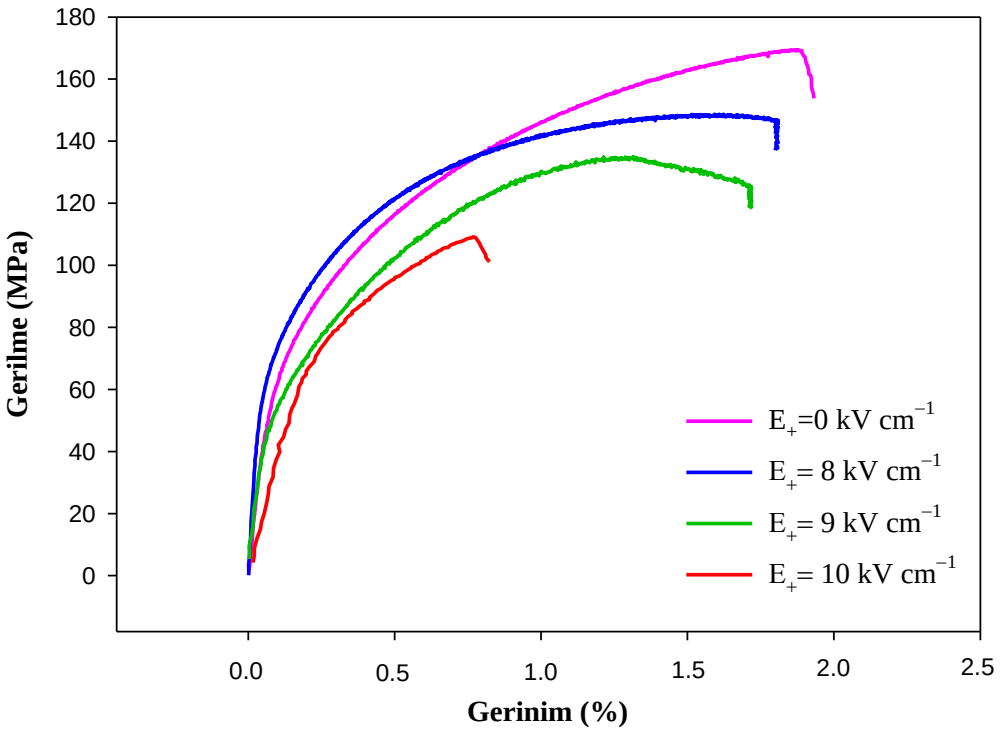
$$\sigma_{NÇM(+)}^{AlCu} = 220,29E_{+}^{-0,771} \tag{4.19}$$

$$\sigma_{NÇM(-)}^{AlCu} = 308,81E_{-}^{0,451} \tag{4.20}$$

Analizlerden görüldüğü gibi $\sigma_{NÇM+}$'nin $E_+$'ye üstel bağlılığı 0,771 iken $\sigma_{NÇM+}$'nin $E_-$'ye üstel bağlılığı 0,451 olarak bulunmuştur. Yani $\sigma_{NÇM+}$'nin $E_+$'ye üstel bağlılığı, $\sigma_{NÇM+}$'nin $E_-$'ye üstel bağlılığından daha güçlüdür.

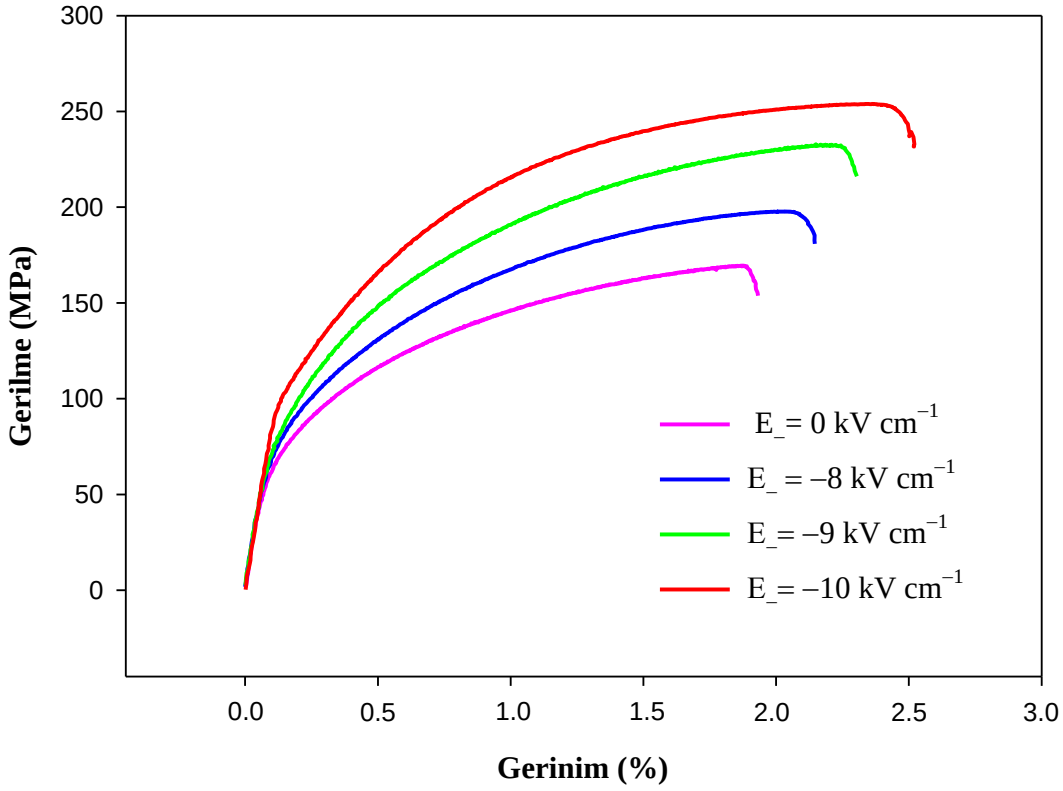
### 4.3.4 Al-Ni Ötektik Alaşımında Nihai Gerilme Mukavemetinin Elektrik Alan Yön ve Büyüklüğüne Bağlılığı

Farklı yön ve büyüklükte yüksek elektrik alan altında katılaştırılan numunelerin gerilme-gerinim eğrilerini gösteren grafikler şekil 4.18 (pozitif elektrik alan uygulaması) ve şekil 4.19 (negatif elektrik alan uygulaması)'da verilmiştir.




**Şekil 4.18** Farklı büyüklükte pozitif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın gerilme-gerinim eğrileri

Standartlara uygun olarak hazırlanan Al-Ni ötektik çekme numuneleri kalibrasyonu tam akredite mekanik laboraturalarında ve uzman personel eşliğinde çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar elektrik alansız katılaştırılan kontrol numunesi ve sırasıyla 8kV/cm, 9Vk/cm ve 10kV/cm pozitif ve negatif elektrik alan altında katılaştırılan numunelerden alınmıştır.



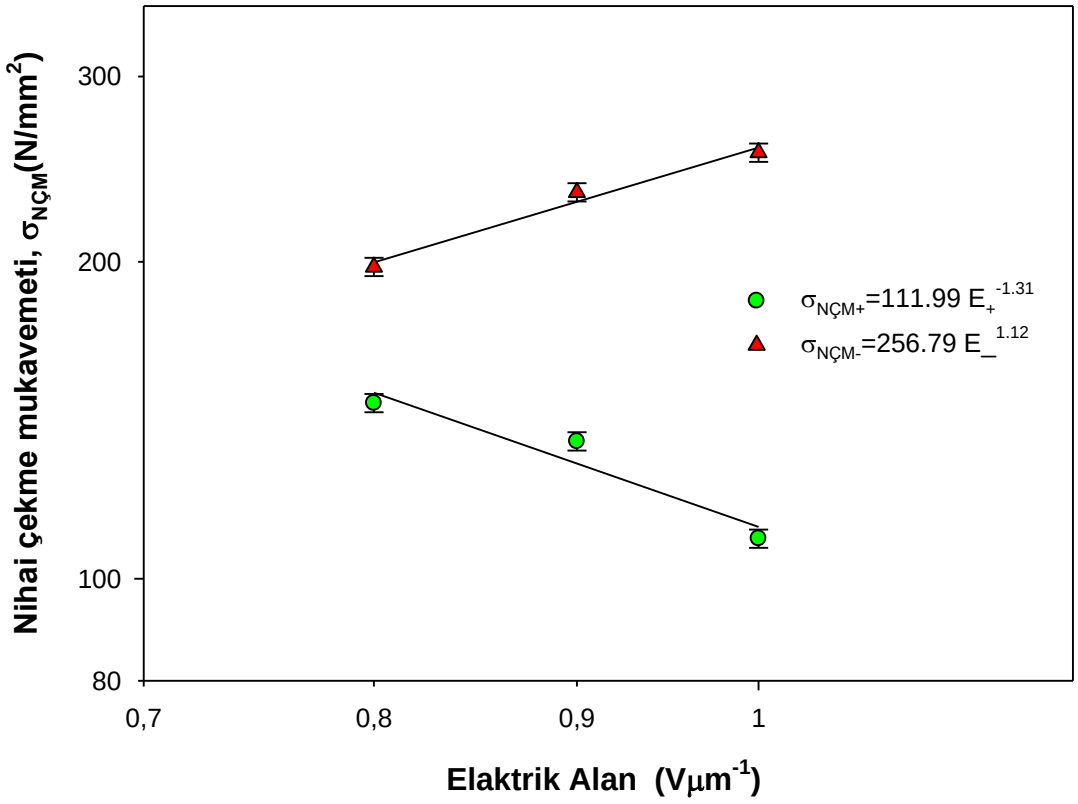

**Şekil 4.19** Farklı büyüklükte negatif elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik alaşımın gerilme-gerinim eğrileri

Sertliğin dışında bir başka önemli mekanik özellik olan nihai gerilme mukavemeti değerleri tablo 4.14'de verilmiştir.

**Tablo 4.17** Farklı yön ve büyüklükte uygulanan elektrik alan altında katılaştırılan Al-Ni ötektik numunelerin nihai çekme mukavemetleri

| **Uygulanan elektrik alan büyüklüğü, E (kV/cm)** | **0** | **8** | **9** | **10** |
|---|---|---|---|---|
| **Nihai çekme mukavemeti, ($E_+$), $\sigma_{NÇM+}$ (N/mm²)** | 169.49±3.38 | 146.82±2.93 | 135.04±2.70 | 109.16±2.18 |
| **Nihai çekme mukavemeti, (E_), $\sigma_{NÇM-}$ (N/mm²)** | 169.49±3.38 | 197.76±3.95 | 232.84±4.65 | 253.99±5.07 |

Al-%6,4Ni ötektik alaşımında $\sigma_{NÇM}$ 'nin E ile nasıl değiştiğini görmek için şekil 4.20 'deki garfik çizdirilmiştir. $\sigma_{NÇM}$ ve E arasındaki ilişkiyi kurmak için lineer regrayon analizi yapılmış ve analiz sonuçları eşitlik (4.21) ve eşitlik (4.22)'de verilmiştir.




**Şekil 4.20** Al-Ni ötektik alaşımında nihai çekme mukavemeti değerlerinin durgun elektrik alanın yön ve büyüklüğü ile değişimi

Lineer regresyon analizi sonucu elde edilen eşitlikler:

$$\sigma_{NÇM(+)}^{AlNi} = 111,99\,E_{+}^{-1,31} \tag{4.21}$$

$$\sigma_{NÇM(-)}^{AlNi} = 256,79\,E_{+}^{1,12} \tag{4.22}$$

Tablo 4.14 ve şekil 4.20'ye bakıldığında elektrik alanın farklı yön büyüklüklerinin tıpkı Al-Cu ötektik alaşımında olduğu gibi Al-Ni ötektik alaşımında da etkili olduğu görülmektedir. Nihai çekme dayanımları $E_+$ büyüklüğünün artmasıyla birlikte düşmüş ve E_'nin artmasıyla birlikte ise yükselmiştir. Regresyon sonucu çıkarılan

eşitlik (4.21) ve (4.22)'ya baktığımızda $\sigma_{NÇM+}$ ve $\sigma_{NÇM-}$'ni E'ye üstel bağlılıkları birbine yakındır.

- **Farklı yön ve büyüklükte yüksek statik elektrik alan altında Al-Cu ve Al-Ni ötektik alaşımlarında nihai çekme mukavemetlerini incelediğimizde;** sertlik deney sonuçlarında da görüldüğü gibi uygulanan durgun elektrik alanın yönüne, büyüklüğüne göre ve mikroyapıdaki değişimle uyumlu bir şekilde artmış veya azalmıştır. Metalik malzemelerde mukavemet ve mikroyapı (tane boyutu) ilişkisi eşitlik (2.48) (Hall-Petch) ile verilmşti.

Yapılan çalışmalara bakıldığında durgun elektrik alan altında katılaştırılmış metallerin mekanik davranıışları üzerine yeterli çalışma bulunmamaktadır. Elektromanyetik (elektromagnetik stirring) etki altında katılaştırma yapılan bir kaç çalışmaya[112]–[114] baktığımızdaysa uyguladıkları işlemin malzemelerde mukavemeti artırdığını belirtmişlerdir.

Farklı yön ve büyüklükte yüksek statik elektrik alan altında Al-Cu ve Al-Ni ötektik alaşımlarında nihai çekme mukavemetlerini incelediğimizde sertlik deney sonuçlarında da görüldüğü gibi uygulanan durgun elektrik alan mikroyapıyla birlikte malzemelrin mekanik davranışlarına da **doğrudan** etki edebildiği iki farklı morfolojik yapıdaki alaşım için de gösterilmiştir.

Elektrik alanın, malzemeler için önemli bir mekanik özellik olan çekme dayanımına etkisini, malzemelerin katılaştırılmasında en önemli parametre olarak kabul edilen V katılaştırma hızı ile kıyasına baktığımızda literatürde; Al-Cu sistemi için mevcut çalışmada $E_+$=10kV/cm'den E_=10kV/cm arasında uygulanan elektrik alan için $\sigma_{NÇM}$=217,42-310,57N/mm$^2$ aralığında bulunan değerlere nispeten, yapılan bir çalışmada[95] $\sigma_{NÇM}$=217,43 - 278,21N/mm$^2$ aralığındaki değerlere V=94,35-2056,68µm/s gibi geniş bir katılaştırma hızı aralığında elde edilmiştir. Çadırlı tarafından yapılan bir başka çalışmada[103] mevcut çalışmadaki ölçümleri kapsayan $\sigma_{NÇM}$=182-312N/mm$^2$ aralığındaki çekme mukavemeti değerleri V=9,52-483,20µm/s aralığındaki çekme hızlarında ölçülmüştür.

Benzer kıyaslama için Al-Ni sisteminde mevcut çalışmada elde edilen $\sigma_{NÇM}$=109,16-253,99N/mm$^2$ nihai çekme mukavemeti değerlerine karşılık yapılan bir çalışmaya

bakıldığında[102] $\sigma_{NÇM}$=141,27-214,87N/mm$^2$ aralığında nihai çekme dayanımları V=8,25-164,8µm/s çekme hızlarında ulaşılmıştır.

Elektrik alan-nihai çekme mukavemeti-katılaştırma hızı arasındaki bağlantıyı gözlemek için yapılan kıyaslamya baktığımızda farklı yön ve büyüklükte uygulanan elektrik alan şartlarında elde edilen çekme mukavemeti değerleri, literatürde geniş bir katılaştırma hızı aralığında elde edilen çekme mukavemeti değerlerine denk gelmektedir. Böylelikle; elektrik alanın katılaştırma hızı V ile olan kıyaslamasında ne kadar etkili bir parametre olduğu, sertlikten sonra bir başka mekanik özellik olan çekme mukavemeti değerleriyle de göstrilmiştir.

Yukarda literatürdeki Al-Cu ve Al-Ni ikili veya çoklu sistemlerinde ötektik mesafenin hıza bağımlılığını belirtilen tablolara benzer şekilde literatürdeki ikili veya çoklu Al-Cu ve Al-Ni sistemlerinde çekme dayanımların büyütme hızına ve elektrik alana bağlılıkarını gösteren tablonun yapılıp üstel değerlerin kıyaslamının yapılmasında fayda vardır.

**Tablo 4.18** Al-Cu ve Al-Ni ikili veya üçlü ötektikleri üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen çekme dayanımlarının katılaştırma hızına ve uygulanan alana bağılığını tanımlayan bağıntıları

| **Alaşım (%ağ.)** | **Bağıntı** | **Kaynak** |
|---|---|---|
| Al-33 Cu | $\sigma^+$=220,29 $E_+^{-0,771}$<br>$\sigma^-$=308,81 $E_-^{0,451}$ | Bu çalışma |
| Al-6,4 Ni | $\sigma^+$=111,99 $E_+^{-1,31}$<br>$\sigma^-$=256,79 $E_-^{1,12}$ | Bu çalışma |
| Al-12,6 Si | $\sigma^+$=251,18 $E_+^{-0,18}$<br>$\sigma^-$=125,89 $E_-^{0,09}$ | [96] |
| Al-32,5%Cu-1%Ni | $\sigma$=153,11 $V^{0,09}$ | [95] |
| Al-33Cu-0.1Ti | $\sigma$=131,52 $V^{0,08}$ | [97] |
| Al-30Cu-6Mg | $\sigma$=408,6 $V^{0,14}$ | [98] |
| Al-28Cu-6Si-2,2Mg | $\sigma$=343,45 $V^{0,15}$ | [99] |
| Al-26Cu-6,5Si-0,5Fe | $\sigma$=69,91 $V^{0,06}$ | [100] |
| Al-6,5Ni-1,5Fe | $\sigma$=105,15 $V^{0,07}$ | [102] |
| Al-11,1Si-4,2Ni | $\sigma$=37,15 $V^{0,19}$ | [111] |

Tablo 4.18'den de görüldüğü gibi Al-Cu ötektik alaşım sisteminde $E_+$ ve $E_-$ 'nin üstel değerleri sırasıyla 0,771 ve 0,451, Al-Ni sisteminde 1,31 ve 1,12, Al-Si sisteminde ise 0,18 ve 0,09 olarak bulunmuştur. Yapılan üstel kıyaslaması neticesinde yukarıdaki parametrelerle(mikroyapı ve sertlik) uyumlu olarak Al-Si sisteminin anılan sebepler neticesinde σ değerlerinin elektrik alana üstel bağlılıkları Al-Cu ve Al-Ni ötektik sistemine göre daha düşüktür. Tablodan görüleceği üzere literatürden alınan değerlere bakıldığında σ değerlerinin V büyütme hızına üstel bağlılıkları diğer parametre değerlendirmelerinde de olduğu gibi mevcut çalışmaların σ değerlerinin elektrik alana üstel bağlılıklarından oldukça düşüktür. Bu sonuçlar elektrik alanın etkisini daha net bir şekilde ortaya koymaktadır.

## 4.4 Genel Sonuçlar ve Öneriler

Katılaştırma sıvı fazdan katı faz bir dönüşüm mekanizmasıdır. İkili veya çoklu metalik alaşımların katılaşmasında atom veya moleküller bir araya gelerek fazları, fazlar biraraya gelerek taneleri ve taneler bir araya gelerek malzemeyi oluştururlar. Dolayısıyla katılaşma mekanizması katı maddelerin oluşumunda dolayısıyla malzemenin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine de büyük rol oynamaktadır. Katılaşma mekanizmasınada en etkili kontrol parametresi katılaşma hızı olarak bilinmektedir fakat bu etkinin de uygulamada sınırlı olduğu bilinmektedir. İlk defa olmak üzere yapılan bu çalışmada;

- Elde edilen gözlemler neticesinde katılaştırma esnasında uygulanan dışsal fiziksel etki ile malzeme özelliklerine etki etme üzerine literatürde çok büyük bir boşluğu bulunan durgun elektrik alan deneyleri yenilikçi bir sistem kurulumu ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Uygulanan elektrik alan, sıvı iyonlar üzerinde bir elektrik alan kuvveti oluşturur ve bu kuvvet, uygulama yönüne göre (katı-sıvı arayüzey büyüme yönüne paralel veya antiparalel) atomik akışta bir artış veya azalmaya yol açar. Elektrik alanın yönü ve büyüklüğü alaşımın mikro yapısını ve tane boyutunu etkiler ve böylece alaşımın mekanik ve fiziksel özelliklerini değiştirir.
- Uygulanan statik elektrik alanın farklı morfolojideki (lamelsel ve çubuksal) iki alaşımda da mikroyapı ve mekanik özelliklere etki edebildiği gösterilmiştir.

- Yapılan ar-ge çalışmaları neticesinde Al tabanlı ikili ve çok bileşenli alaşımlarda hem pozitif hem de negatif elektrik alan yönleri için uygulanması gereken minimum bir elektrik alan değerinin ana fazın katı-sıvı arayüzey enerjisine bağlı olduğununu bu minimum alan değerinin Al esaslı ikili veya çoklu alaşım sistemleri için 6 kV/cm olarak belirlenmiştir.
- Alınan sonuçlar ve yapılan analziler sonucu durgun elektrik alanın doğrusal katılaştırmada en azından katılaştırma hızı kadar etkili bir kontrol parametresi olduğu görülmüştür.
- Sonuçlara göre durgun elektrik alan altında katılaştırmada atomik akış mekanizması karmaşık olmakla birlikte sıvı atomların elektrik yükü olarak yüklenme derecesine, atomik kütlelerine, sistemin bileşim oranlarına ve ergime sıcaklıklarına bağlı olabileceği gözlemine varılmıştır. Mevcut çalışmada da görüldüğü gibi malzemeye göre ve uygulanan yöne göre incelenen özelliklerin farklılık göstermesi bununla ilintilidir. Buna göre uygulanacak farklı metalik malzemeler için çok farklı sonuçlar elde edilebileceğinden bir çok farklı metalik sistemlerin sıvı-katı dönüşümüne uygulanabilir.
- Literatürdeki çalışmaların aksine etkinin tek yönlü değil iki yönlü olarak gerçekleşmesi bu çalışmanın en büyük artısıdır. Buna göre uygun techizat ve doğru bir kurulum ile uygulanacak yeterli büyüklükteki negatif $E_-$ yani katılaşma yönüne zıt yöndeki durgun elektrik alan değerleriyle mikroyapıların inceltilerek nano boyutta çalışmalar yapılmasına ve yine yeterli büyüklükte pozitif durgun elektrik alan yani katılaşma yönüyle aynı yönde durgun $E_+$ değerleriyle katılaşma hızını yeterince yavaşlatarak tek kristal çalışmlarında kullanılabilmesine imkan tanıyabilir.
- Yapılan çalışmada elektrik alan silindirik numuneye eksenel olarak uygulandı. Eksenel elektrik alan uygulamanın yanısıra eş zamalı olarak radial doğrultuda elektrik alan uygulayarak özellikle denritik büyütmede denritik ikincil kollara müdahale edilebileceği dolayısıla büyümeye üç boyutlu etki yapılacağı kapısını aralamıştır.
- Yukarıda elde edilen tüm sonuçlardan yola çıkarak mevcut çalışma, durgun elektrik alan uygulamasının katılaştırma ve imalat endüstrisi için ekonomik, umut verici bir yeşil teknoloji olabileceğini göstermiştir.

- Uygulanan durgun elektrik alanının metalik alaşımların katılaşma mekanizmasına etki ettiği gibi metalik malzemlerin katı-katı dönüşümlerine de etki edebileceği, katı içerisindeki difüzyon mekanizmasını hızlandıracağı dolayısıyle ısıl işlemlerde ve yaşlandırma ile mekanik özellikleri değiştirme işlemlerinde kullanılabileceği ve gerekli olan ısıl işelm süresini kısaltarak daha ekonomik olabileceği gözlenmiştir.
- Toz metalurjisi ar-ge işlemlerinde de kullanılarak metalik tozların karışımlarında ve ısıl işlemlerinde etkili bir rol oynayabilecği düşünülmektedir.
- İletken olan metalik sistemlerde olduğu gibi seramik-metalik karışımlara ve camlara rahatlıkla uygulanabileceği düşünülmektedir. Cam içerisine atomik çapı büyük veya küçük metalleri durgun elektrik alan kuvvetiyle yerleştirerek mekanik özellikerin iyileşme husunda çalışmaların yapılabileceğini göstermektedir.

# KAYNAKÇA


[1] P. A. Thornton and V. J. Colangelo, *Fundamentals of engineering materials*. Englewood Cliffs N.J.: Prentice-Hall, 1985.

[2] "Engineering Materials and Processes | springerprofessional.de." [Online]. Available: https://www.springerprofessional.de/engineering-materials-and-processes/1018390. [Accessed: 03-Mar-2020].

[3] K. Onaran, "Malzeme bilimi," 1999.

[4] R. M. Jordan and J. D. Hunt, "The growth of lamellar eutectic structures in the Pb-Sn and Al-CuAl2 systems," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 2, no. 12, pp. 3401–3410, 1971.

[5] G. Piatti and G. Pellegrini, "The structure of the unidirectionally solidified Al-Al21Pt5 eutectic alloys," *J. Mater. Sci.*, vol. 15, no. 9, pp. 2403–2408, 1980.

[6] E. Cadirli, A. Ulgen, and M. Gunduz, "Directional solidification of the aluminum-copper eutectic alloy," *Materials Transactions, JIM*, vol. 40, no. 9. pp. 989–996, 1999.

[7] M. Gündüz, H. Kaya, E. Çadirli, and A. Özmen, "Interflake spacings and undercoolings in Al-Si irregular eutectic alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 369, no. 1–2, pp. 215–229, 2004.

[8] J. De Wilde, E. Nagels, F. Lemoisson, and L. Froyen, "Unconstrained growth along a ternary eutectic solidification path in Al-Cu-Ag: Preparation of a MAXUS sounding rocket experiment," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 413–414, pp. 514–520, 2005.

[9] U. Böyük and N. Maraşli, "The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn-Ag-Cu eutectic alloy," *J. Alloys Compd.*, vol. 485, no. 1–2, pp. 264–269, 2009.

[10] F. Yilmaz and R. Elliott, "The microstructure and mechanical properties of unidirectionally solidified Al-Si alloys," *J. Mater. Sci.*, vol. 24, no. 6, pp. 2065–2070, 1989.

[11] A. A. Wheeler, S. R. Coriell, G. B. McFadden, and D. T. J. Hurle, "The effect of an electric field on the morphological stability of the crystal-melt interface of a binary alloy," *J. Cryst. Growth*, vol. 88, no. 1, pp. 1–15, 1988.

[12] X. Li, Y. Fautrelle, A. Gagnoud, Z. Ren, and R. Moreau, "EBSD Study of the Influence of a High Magnetic Field on the Microstructure and Orientation of the Al-Si Eutectic During Directional Solidification," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 6, pp. 2952–2963, 2016.

[13] Z. Y. Liao *et al.*, "Effect of Pulsed Electric Field on the Distribution and Migration of P, S, and Si Elements of Fe-Based Alloys," *Adv. Mater. Res.*, vol. 194–196, pp. 371–374, 2011.

[14] T. Manuwong, "Solıdıfıcatıon Of Metal Alloys In Pulse Electromagnetıc Fıelds,"

Chulalongkorn University, Thailand, 2015.

[15] Y. Zhong, J. Wang, T. Zheng, Y. Fautrelle, and Z. Ren, "Homogeneous hypermonotectic alloy fabricated by Electric-Magnetic-Compound field assisting solidification," *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 0, pp. S364–S372, 2015.

[16] B. Liu, Z. Zhao, Y. Wang, and Z. Chen, "The solidification of Al-Cu binary eutectic alloy with electric fields," *J. Cryst. Growth*, vol. 271, no. 1–2, pp. 294–301, 2004.

[17] G. J. Davies, *Solidification and casting*. 2016.

[18] J.W.Christian, *The Theory of Transformations in Metals and Alloys*. Elsevier, 2002.

[19] B. Chalmers, *Principles of solidification*. New York N.Y. Wiley 1964, 1964.

[20] D. M. Stefanescu, *Science and Engineering of Casting Solidification*, vol. 6, no. 1. 2009.

[21] D. A. Porter, K. E. Easterling, and M. Y. Sherif, *Phase transformations in metals and alloys, third edition*. 2009.

[22] D. A. P. and K. E. Easterling, *Phase Transformations in Metals and Alloys Second Edition*. 1384.

[23] J. Burke, *The Kinetics of Phase Transformations in Metals*. Oxford,;New York,: Pergamon Press, 1965.

[24] D. P. Woodruff, *The solid-liquid interface*. Cambridge University Press, 1973.

[25] R. Elliot, *Eutectic Solidification Processing Crystalline and Glassy Alloys*. 1983.

[26] J. Gong, C. Liu, P. P. Conway, and V. V. Silberschmidt, "Crystallographic structure and mechanical behaviour of SnAgCu solder interconnects under a constant loading rate," *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, no. January, pp. 677–683, 2007.

[27] A. Nielsen, *Kinetics of precipitation,*. Oxford ;New York: Pergamon Press; [distributed in the Western Hemisphere by Macmillan New York], 1964.

[28] W. J. Askeland, Donald R. Fulay, Pradeep P. Wright, *The Science and engineering of Materials*, vol. 28, no. 9. 2003.

[29] D. J. F. W Kurz, *Fundamentals of solidification*. 1989.

[30] P. Papon J. Leblond P.H.E. Meijer, *The Physics of Phase Transitions*, vol. 53, no. 9. 2013.

[31] D. Turnbull and R. E. Cech, "Microscopic observation of the solidification of small metal droplets," *J. Appl. Phys.*, vol. 21, no. 8, pp. 804–810, 1950.

[32] D. Turnbull, "The supercooling of aggregates of small metal particles," *Jom*, vol. 2, no. 9, pp. 1144–1148, 1950.

[33] D. Turnbull, "The subcooling of liquid metals [4]," *J. Appl. Phys.*, vol. 20, no. 8, p. 817, 1949.

[34] D. Turnbull, "Kinetics of heterogeneous nucleation," *J. Chem. Phys.*, vol. 18, no.

2, pp. 198–203, 1950.

[35] D. Turnbull and J. C. Fisher, “Rate of nucleation in condensed systems,” *J. Chem. Phys.*, vol. 17, no. 1, pp. 71–73, 1949.

[36] R. Becker and W. Döring, “Kinetische Behandlung der Keimbildung in übersättigten Dämpfen,” *Ann. Phys.*, vol. 416, no. 8, pp. 719–752, 1935.

[37] C. Lemaignan, M. C. Cheynet, and N. Eustathopoulos, “Nucleation behaviour of silver-germanium eutectic alloys,” *J. Cryst. Growth*, vol. 50, no. 3, pp. 720–728, 1980.

[38] C. Lemaignan, “Initial stages of eutectic solidification,” *Acta Metall.*, vol. 29, no. 8, pp. 1379–1384, 1981.

[39] G. L. F. Powell, G. A. Colligan, and A. W. Urquhart, “Nucleation in undercooled Sn-Sb alloys,” *Metall. Trans.*, vol. 2, no. 3, pp. 918–919, 1971.

[40] J. H. Hollomon and D. Turnbull, “Solidification of Lead-Tin Alloy Droplets,” *Jom*, vol. 3, no. 9, pp. 803–805, 1951.

[41] B. Sundquist, L. M. the M. S. of AIME, and U. 1961, “Orientation Relationships in the Heterogeneous Nucleation of Solid Lead from Liquid Lead,” *aimehq.org*.

[42] S. Engin and U. Büyük, “Kontrollü Doğrusal Katılaştırılan Al-Cu Alaşımının Mikroyapısı, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaştırma Hızına Bağlı Değişimi,” *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 8, pp. 209–221, 2018.

[43] W. J. Boettinger *et al.*, “Solidification microstructures: recent developments, future directions,” *Acta Mater.*, vol. 48, no. 1, pp. 43–70, 2000.

[44] H. Jones, “Some effects of solidification kinetics on microstructure formation in aluminium-base alloys,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 413–414, pp. 165–173, 2005.

[45] U. Hecht *et al.*, “Multiphase solidification in multicomponent alloys,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 46, no. 1–2, pp. 1–49, 2004.

[46] M. Qu, L. Liu, Y. Cui, and F. Bin Liu, “Interfacial morphology evolution in directionally solidified Al-1.5%Cu alloy,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.*, vol. 25, no. 2, pp. 405–411, 2015.

[47] X. Li, Y. Fautrelle, and Z. Ren, “Influence of thermoelectric effects on the solid-liquid interface shape and cellular morphology in the mushy zone during the directional solidification of Al-Cu alloys under a magnetic field,” *Acta Mater.*, vol. 55, no. 11, pp. 3803–3813, 2007.

[48] J. D. Miller and T. M. Pollock, “Stability of dendrite growth during directional solidification in the presence of a non-axial thermal field,” *Acta Mater.*, vol. 78, pp. 23–36, 2014.

[49] T. Agrawal, “Eutectic Solidification and Reactions in Molten Eutectics,” Udai Pratap Autonomous College, 2010.

[50] D. Du *et al.*, “Effect of an axial high magnetic field on Sn dendrite morphology of Pb-Sn alloys during directional solidification,” *J. Alloys Compd.*, vol. 588, pp. 190–198, 2014.

[51] M. Paliwal and I. H. Jung, “The evolution of the growth morphology in Mg-Al alloys depending on the cooling rate during solidification,” *Acta Mater.*, vol. 61, no. 13, pp. 4848–4860, 2013.

[52] Francis M Mutuku, “Controlling Microstructure and Mechanical Properties of the New Microelectronic Interconnect Alloys,” Egerton University, 1996.

[53] H. Walker, S. Liu, J. H. Lee, and R. Trivedi, “Eutectic growth in three dimensions,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 38 A, no. 7, pp. 1417–1425, 2007.

[54] S. T. Bluni, “Solidification of Eutectic and Off-Eutectic Al-Zn Alloys,” Lehigh University, 1994.

[55] U. Böyük, “Üçlü Metalik Alaşımların Kontrollü Doğrusal Katılaştırılması ve Mikrosertliğin İncelenmsei,” Erciyes Üniversitesi, 2009.

[56] Y. Kaygisiz, “Doğrusal katılaştırılmış Al- % 13ağ . Mg 2 Si alaşımının mikroyapı karakterizasyonu,” vol. 30, no. V, pp. 723–731, 2017.

[57] M. H. Burden and J. D. Hunt, “Cellular and dendritic growth. ii,” vol. 22, no. December 1973, pp. 109–116, 1974.

[58] Z. S. Basar, “Titanyum Zirkonyum ve Bor Katkılı A356 Alaşımlarının Termal İletkenliklerinin ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,” Yıldız Teknik Üniversitesi, 2020.

[59] U. Böyük and N. M. Ş. Li, “Comparison of experimental results with theoretical eutectic model in In-Bi-Sn ternary alloy kar ş ı la ş t ı r ı lmas ı,” vol. 26, no. 1, pp. 71–76, 2010.

[60] K. A. Jackson and J. D. Hunt, “Lamellar and Rod Eutectic Growth,” *Dyn. Curved Front.*, vol. 236, pp. 363–376, 1988.

[61] R. Trivedi, P. Magnin, and W. Kurz, “Theory of eutectic growth under rapid solidification conditions,” *Acta Metall.*, vol. 35, no. 4, pp. 971–980, 1987.

[62] J. De Wilde, L. Froyen, V. T. Witusiewicz, and U. Hecht, “Two-phase planar and regular lamellar coupled growth along the univariant eutectic reaction in ternary alloys: An analytical approach and application to the Al-Cu-Ag system,” *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 11, 2005.

[63] R. J. Stefanescu, D.M.; Abbaschian, G.J.; Bayuzick, “Solidification processing of eutectic alloys; Proceedings of the Symposium, Cincinnati, OH, Oct. 12-15, 1987 (Conference) | OSTI.GOV.” [Online]. Available: https://www.osti.gov/biblio/6231808. [Accessed: 17-Mar-2020].

[64] J. D. Hunt and S. Lu, “Numerical Modeling of Cellular / Dendritic Array Growth : Spacing and Structure Predictions,” 1996.

[65] K. E. Easterling and Institute of Metals., *Tomorrow’s materials*. Institute of Metals, 1990.

[66] G. A. Chadwick, “Decanted interfaces and growth forms,” vol. 10, 1962.

[67] M. N. Croker, R. S. Fidler, and R. W. Smith, “The cellular growth of Bi-Pb2Bi eutectic,” *J. Cryst. Growth*, vol. 11, no. 2, pp. 121–130, 1971.

[68] M. N. Croker, D. Baragar, and R. W. Smith, “Anomalous eutectic growth. II. The relationship between faceted/non-faceted eutectic structures,” *J. Cryst. Growth*, vol. 30, no. 2, pp. 198–212, 1975.

[69] R. Elliott, “Eutectic solidification,” *Mater. Sci. Eng.*, vol. 65, no. 1, pp. 85–92, 1984.

[70] M. E. Glicksman, *Principles of solidification*, vol. 53, no. 9. 2013.

[71] J. Zhang, J. Shen, Z. Shang, Z. Feng, L. Wang, and H. Fu, “Regular rod-like eutectic spacing selection during directional solidified NiAl9Mo eutectic in situ composite,” *J. Cryst. Growth*, vol. 329, no. 1, pp. 77–81, 2011.

[72] P. Magnin and R. Trivedi, “Eutectic growth: A modification of the Jackson and Hunt theory,” *Acta Metall. Mater.*, vol. 39, no. 4, pp. 453–467, 1991.

[73] J. Liu and R. Elliott, “Irregular eutectic solidification,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 173, no. 1–2, pp. 129–132, 1993.

[74] W. A. Tiller, *Principles of Solidification*. 1961.

[75] X. Chen, M. Li, X. X. Ren, A. M. Hu, and D. L. Mao, “Effect of small additions of alloying elements on the properties of Sn-Zn eutectic alloy,” *J. Electron. Mater.*, vol. 35, no. 9, pp. 1734–1739, 2006.

[76] X. Liu, “Crystallographic and microstructural study of as-cast and heat-treated Srmodified Al-12 . 7Si alloys Xiaorui Liu soutenance et mis à disposition de l ’ ensemble de la Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr,” 2017.

[77] S. H. Chen, C. C. Chen, Z. P. Luo, and C. G. Chao, “Fabrication and characterization of eutectic bismuth-tin (Bi-Sn) nanowires,” *Mater. Lett.*, vol. 63, no. 13–14, pp. 1165–1168, 2009.

[78] J. Li, P. Ni, L. Wang, and Y. Tan, “Influence of direct electric current on solidification process of Al–Si alloy,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 61, no. July 2016, pp. 79–84, 2017.

[79] R. Z. Wang, J. G. Qi, B. Wang, W. Zhang, and J. Z. Wang, “Solidification behavior and crystal growth mechanism of aluminum under electric pulse,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 237, pp. 235–242, 2016.

[80] J. Huang, L. Qi, J. Luo, L. Zhao, and H. Yi, “Suppression of gravity effects on metal droplet deposition manufacturing by an anti-gravity electric field,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 148, no. May 2019, p. 103474, 2020.

[81] Q. Lan, C. Cheng, J. Zhang, R. Guo, and Q. Le, “The relationship between the thermoelectric power and resultant solidification microstructures of Al-Si melt under electromagnetic field,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 231, no. December 2018, pp. 203–215, 2019.

[82] Z. Chen, H. Ding, R. Chen, S. Liu, J. Guo, and H. Fu, “An innovative method for the microstructural modification of TiAl alloy solidified via direct electric current application,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 1, pp. 23–28, 2019.

[83] C. He, Y. Li, J. Li, G. Xu, Z. Wang, and D. Wu, “Effect of electromagnetic fields on microstructure and mechanical properties of sub-rapid solidification-

processed Al–Mg–Si alloy during twin-roll casting," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 766, no. August, 2019.

[84] Z. Shen *et al.*, "Evolution of the microstructure and solute distribution of Sn-10wt% Bi alloys during electromagnetic field-assisted directional solidification," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 568–577, 2019.

[85] Y. Tang, S. Qiu, Q. Miao, and C. Wu, "Fabrication of lamellar porous alumina with axisymmetric structure by directional solidification with applied electric and magnetic fields," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 36, no. 5, pp. 1233–1240, 2016.

[86] S. Asaı, "Birth and Recent Activities of Electromagnetic Processing of Materials," vol. 29, no. 12, pp. 981–992, 1989.

[87] D. Samanta and N. Zabaras, "Control of macrosegregation during the solidification of alloys using magnetic fields," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, no. 25–26, pp. 4850–4866, 2006.

[88] D. Shu, B. Sun, K. Li, J. Wang, and Y. Zhou, "Effects of secondary flow on the electromagnetic separation of inclusions from aluminum melt in a square channel by a solenoid," *ISIJ Int.*, vol. 42, no. 11, pp. 1241–1250, 2002.

[89] M. Aravind, P. Yu, M. Y. Yau, and D. H. L. Ng, "Formation of Al2Cu and AlCu intermetallics in Al(Cu) alloy matrix composites by reaction sintering," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 380, no. 1, pp. 384–393, 2004.

[90] H. Okamoto, "Al-Ni (Aluminum-Nickel)," *J. Phase Equilibria Diffus.*, vol. 25, no. 4, pp. 394–394, 2004.

[91] S. C. Gill and W. Kurz, "Rapidly solidified AlCu alloys-I. experimental determination of the microstructure selection map," *Acta Metall. Mater.*, vol. 41, no. 12, pp. 3563–3573, 1993.

[92] A. Çadırlı, E., Böyük, U., Engin, S., Kaya, H., Maraşlı, N., Ülgen, "Experimental investigation of the effect of solidification processing parameters on the rod spacings in the Sn – 1 . 2 wt .% Cu alloy," vol. 486, pp. 199–206, 2009.

[93] V. B. John, *Engineering Materials*. 1990.

[94] A. Ourdjini, J. Liu, and R. Elliott, "Eutectic Spacing Selection in Al-Cu System," vol. 10, no. April, pp. 312–318, 1994.

[95] Ü. Bayram and N. Maraşlı, "Influence of Growth Rate on Eutectic Spacing, Microhardness, and Ultimate Tensile Strength in the Directionally Solidified Al-Cu-Ni Eutectic Alloy," *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 49, no. 6, pp. 3293–3305, 2018.

[96] S. Birinci, "Alüminyum Silisyum Ötektik Alaşımın Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Elektrik Alana Bağlılığının İncelenmesi," Yıldız Teknik Üniversitesi, 2020.

[97] Ü. Bayram and N. Maraşli, "Effects of Growth Rate on Eutectic Spacing , Microhardness , and Ultimate Tensile Strength in the Al – Cu – Ti Eutectic Alloy," vol. 121, no. 4, pp. 426–434, 2020.

[98] Y. Kaygısız and N. Maraşlı, "Microstructural , Mechanical , and Electrical

Characterization of Directionally Solidified Al – Cu – Mg Eutectic Alloy 1," vol. 118, no. 4, pp. 389–398, 2017.

[99] Y. Kaygısız and N. Maraşlı, "Directional solidification of Al–Cu–Si–Mg quaternary eutectic alloy," *J. Alloys Compd.*, vol. 721, pp. 764–771, 2017.

[100] U. Büyük, S. Engin, H. Kaya, E. Çadırlı, and N. Maraşlı, "Directionally Solidified Al – Cu – Si – Fe Quaternary Eutectic Alloys," vol. 121, no. 1, pp. 78–83, 2020.

[101] H. Kaya, U. Böyük, E. Çadirli, and N. Maraşli, "Unidirectional solidification of aluminium-nickel eutectic alloy," *Kov. Mater.*, vol. 48, no. 5, pp. 291–300, 2010.

[102] S. Engin, U. Büyük, and N. Maraşli, "The effects of microstructure and growth rate on microhardness, tensile strength, and electrical resistivity for directionally solidified Al-Ni-Fe alloys," *J. Alloys Compd.*, vol. 660, pp. 23–31, 2016.

[103] E. Çadırlı, "Effect of solidification parameters on mechanical properties of directionally solidified Al-Rich Al-Cu alloys," *Met. Mater. Int.*, vol. 19, no. 3, pp. 411–422, 2013.

[104] X. Liao, Q. Zhai, J. Luo, W. Chen, and Y. Gong, "Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum," *Acta Mater.*, vol. 55, no. 9, pp. 3103–3109, 2007.

[105] J. Li, J. Ma, Y. Gao, and Q. Zhai, "Research on solidification structure refinement of pure aluminum by electric current pulse with parallel electrodes," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 490, no. 1–2, pp. 452–456, 2008.

[106] J. Ma, J. Li, Y. Gao, and Q. Zhai, "Grain refinement of pure Al with different electric current pulse modes," *Mater. Lett.*, vol. 63, no. 1, pp. 142–144, 2009.

[107] X. Bin Li, F. G. Lu, H. C. Cui, and X. H. Tang, "Migration behavior of solidification nuclei in pure Al melt under effect of electric current pulse," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.*, vol. 24, no. 1, pp. 192–198, 2014.

[108] K. Zaïdat, N. Mangelinck-Noël, and R. Moreau, "Control of melt convection by a travelling magnetic field during the directional solidification of Al-Ni alloys," *Comptes Rendus - Mec.*, vol. 335, no. 5–6, pp. 330–335, 2007.

[109] Y. Kaygısız, "Microstructure characterization and hardness of Al-Cu-Mn eutectic alloy," *China Foundry*, vol. 15, no. 5, pp. 390–396, 2018.

[110] H. Kaya, U. Böyük, E. Çadirli, and N. Maraşli, "Measurements of the microhardness, electrical and thermal properties of the Al-Ni eutectic alloy," *Mater. Des.*, vol. 34, pp. 707–712, 2012.

[111] U. Böyük, "Physical and mechanical properties of Al-Si-Ni eutectic alloy," *Met. Mater. Int.*, vol. 18, no. 6, pp. 933–938, Dec. 2012.

[112] L. Yao, H. Hao, S. W. Gu, H. W. Dong, and X. G. Zhang, "Effects of electromagnetic stirring on microstructure and mechanical properties of super light Mg-Li-Al-Zn alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.*, vol. 20, no. SUPPL. 2, pp. s388–s392, 2010.

[113] Y. Du, Y. Lu, T. Wang, T. Li, and G. Zhang, "Effect of electromagnetic stirring on

microstructure and properties of Al0.5CoCrCuFeNi alloy," *Procedia Eng.*, vol. 27, no. 2011, pp. 1129–1134, 2012.

[114] Z. Liu, W. M. Mao, and X. M. Liu, "Characterization on morphology evolution of primary phase in semisolid A356 under slightly electromagnetic stirring," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.*, vol. 20, no. SUPPL. 3, pp. s805–s810, 2010.

# TEZDEN ÜRETILMIŞ YAYINLAR

**İletişim Bilgisi:** sercanbst@gmail.com

**Makaleleri**

**1**. S. Basit, S. Birinci and N. Maraşlı, "Electro growth of Al-Cu eutectic alloy," Materials Characterization , vol.161, no.110157, 2020

**Konferans Bildirileri**

**1**. S. Basit, S. Birinci and N. Maraşlı, "Directional electro growth of Al-Cu eutectic alloy under different directions and magnitudes of electrical fields," DSEC VI -Directionally Solidified Eutectics Conference , Naples, Italy, pp.6, 2019

**2**. S. Basit, S. Birinci and N. Maraşlı, "Dependency of Eutectic Spacing and Microhardens on Directions and Magnitudes of Uniform Elecffical Field in the Al-Cu Eutectic Alloy," 19. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, IMMC 2018 , İstanbul, Turkey, pp.457, 2018

**Projeler**

**1**. Al-Cu, Al-Ni ve Al-Si Ötektik Alaşımların Farklı Yön Ve Büyüklükteki Yüksek Elektrik Gerilimi Altında Katılaştırılması Ve Mikroyapı, Mekanik, Elektrik Ve Termal Özelliklerinin Elektrik Gerilime Bağlılığının İncelenmesi, Prof. Dr.Necmettin Maraşlı, TUBİTAK 118M695, 2018-2021, Bursiyer.