T.C. ERC YES ÜN VERS TES FEN B L MLER ENST TÜSÜ F Z K ANAB L M DALI

AI-SI ÖTEKT K ALA IMINA YAPILAN KATKI ELEMENTLER N N (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) M KROYAPI ve F Z KSEL ÖZELL KLER NE ETK S N N ARA TIRILMASI

Hazırlayan Aynur AKER

Danı man Prof. Dr. Hasan KAYA

Doktora Tezi

Ocak 2015 KAYSER

T.C. ERC YES ÜN VERS TES FEN B L MLER ENST TÜSÜ F Z K ANAB L M DALI

Al-Si ÖTEKT K ALA IMINA YAPILAN KATKI ELEMENTLER N N (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) M KROYAPI ve F Z KSEL ÖZELL KLER NE ETK S N N ARA TIRILMASI

(Doktora Tezi)

Hazırlayan Aynur AKER

Danı man Prof. Dr. Hasan KAYA

Bu çalı ma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Ara tırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-13-4562 kodlu proje ile desteklenmi tir.

> Ocak 2015 KAYSER

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

i

Aynur AKER

Al-Si Ötektik Ala ımına Yapılan Katkı Elementlerinin (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) Mikroyapı ve Fiziksel Özelliklerine Etkisinin Ara tırılması adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmı tır.

Tezi

ışman Prof. Dr. Hasan k

Fizik ABD Ba kanı

Prof. Dr. Ayhan GÜLDESTE

Prof. Dr. Hasan KAYA danı manlı ında **Aynur AKER** tarafından hazırlanan "**Al-Si Ötektik Ala ımına Yapılan Katkı Elementlerinin (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) Mikroyapı ve Fiziksel Özelliklerine Etkisinin Ara tırılması**" adlı bu çalı ma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmi tir.

30/01/2015

JÜRİ:

Danışman	: Prof. Dr. Hasan KAYA
Üye	: Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN
Üye	: Prof. Dr. Emin ÇADIRLI
Üye	: Prof. Dr. Kâzım KEŞLİOĞLU
Üye	: Doç. Dr. Uğur BÜYÜK



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 19. 102.12015 tarih ve 2015. 1.0.9. -. 1.0 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Hasan KAYA danı manlı ında **Aynur AKER** tarafından hazırlanan "**Al-Si Ötektik Ala ımına Yapılan Katkı Elementlerinin (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) Mikroyapı ve Fiziksel Özelliklerine Etkisinin Ara tırılması**" adlı bu çalı ma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmi tir.

30/01/2015

JÜRİ:

Danışman	: Prof. Dr. Hasan KAYA
Üye	: Prof. Dr. Mustafa GENÇASLAN
Üye	: Prof. Dr. Emin ÇADIRLI
Üye	: Prof. Dr. Kâzım KEŞLİOĞLU
Üye	: Doç. Dr. Uğur BÜYÜK



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 19. 102.12015 tarih ve 2015. 1.0.9. -. 1.0 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



TE EKKÜR

Çalı malarım boyunca farklı bakı açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, deste ini ve yardımını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Hasan KAYA'ya te ekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalı malarım sırasında kar ıla tı ım zorlukları a mamda yardımını esirgemeyen Prof. Dr. Emin ÇADIRLI, Doç. Dr. U ur BÜYÜK ve Yrd. Doç. Dr. Sevda ENG N'e te ekkür ederim.

Bu tez çalı masına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Ara tırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje No: FDK-13-4562) te ekkür ederim.

Her konuda beni yüreklendiren ve çalı malarımın her a amasında benden deste ini ve eme ini esirgemeyen e im Asker AKER'e sabrı, özverisi ve bana olan inancı için tekrar tekrar te ekkür ederim.

Aynur AKER

Ocak 2015, KAYSER

AI-SI ÖTEKT K ALA IMINA YAPILAN KATKI ELEMENTLER N N (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) M KROYAPI ve F Z KSEL ÖZELL KLER NE ETK S N N ARA TIRILMASI

Aynur AKER

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ocak 2015 Tez Danı manı: Prof. Dr. Hasan KAYA

ÖZET

Son yıllarda, endüstri ve teknolojide, alüminyum esaslı ala ımların kullanımı artmaktadır. Alüminyuma katkılanan ala ımlama elementleri alüminyumun mukavemet ve sertlik özelliklerini daha da iyile tirerek di er metallere göre üstün olmasını sa lamaktadır.

Bu çalı mada, katkı maddelerinin (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi), Al-Si ötektik ala ımının fiziksel özelliklerine (mikroyapı, mikrosertlik, çekme dayanımı, elektriksel iletkenlik ve ısısal özellikler) etkisi ara tırıldı. Bu amaçla, Al-Si-x (x= Co, Cu, Ni, Sb ve Bi) üçlü ala ımları farklı büyütme hızlarında ve sabit sıcaklık gradyentinde katıla tırıldı. Do rusal katıla tırılmı ala ımların mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelendi. Do rusal katıla tırılmı ala ımların mikroyapıları taramalı elektron mikrosertlik, çekme dayanımı, elektriksel özdirençleri ve ısısal özellikleri incelendi. Farklı katıla tırıma hızları ile mikrosertlik, çekme-dayanımı, elektriksel özdirenç arasındaki ili kiler elde edildi.

Bu sonuçlara göre, katıla tırma hızının artmasıyla ötektik mesafelerin azaldı 1, buna kar ın mikrosertlik, çekme-dayanım ve elektriksel özdirenç de erlerinin arttı 1 tespit edildi. Katkılama elementlerinin Al-Si ötektik ala ımının mikroyapı, mekaniksel, elektriksel ve ısısal özelliklerine etkisi oldu u tespit edildi. Elde edilen deneysel sonuçlar literatürde bulunan benzer deneysel çalı maların sonuçları ile kar ıla tırıldı.

Anahtar Kelimeler: Ötektik ala ımlar, Katkılama, Mikroyapı, Mikrosertlik, Çekmedayanımı, Elektriksel özdirenç.

INVESTIGATION OF EFFECTS OF CONTENT MATTERS (Cu, Co, Ni, Sb and Bi) ON THE MICROSTRUCTURE and PHYSICAL PROPERTIES IN THE AI-Si EUTECTIC ALLOY

Aynur AKER

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences Ph.D. Thesis, January 2015 Thesis Supervisor: Prof. Dr. Hasan KAYA

ABSTRACT

In recent years, the use of the aluminum based alloys in the industry and technology are increasing. Alloying elements in aluminum have further been improving the strength and stiffness properties that provide superior compared to other metals.

In this study, the effects of content elements (Cu, Co, Ni, Sb and Bi) on the physical properties (microstructure, microhardness, tensile strength, electrical conductivity and thermal properties) in the Al-Si eutectic alloy were investigated. For this purpose, Al-Si-x (x= Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) ternary alloys were directionally solidified with growth rates at a constant temperature gradient. Microstructures of directionally solidified alloys were analyzed by using scanning electron microscopy (SEM). Microhardness, tensile strength, electrical resistivity and thermal properties of directionally solidified alloys were measured. The relationship among the growth rate, eutectic spacings, microhardness, tensile strength, electrical resistivity were determined.

According to these results, it has been found that the values of eutectic spacing decrease with the increasing values of growth rates, whereas the values of the microhardness, tensile strength and electrical resistivity increase with the increasing values of growth rates. It was found that content elements effected on microstructures, mechanical, electrical and thermal properties of Al-Si eutectic alloy. The experimental results obtained in this study have been compared with the previous similar experimental results in the literature.

Keywords: Eutectic alloys, Additives, Microstructure, Microhardness, Tensile strength, Electrical resistivity.

Al-Si ÖTEKT K ALA IMINA YAPILAN KATKI ELEMENTLER N N (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) M KROYAPI ve F Z KSEL ÖZELL KLER NE ETK S N N ARA TIRILMASI

<u>Sayfa</u>

B L MSEL ET E UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
TE EKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
Ç NDEK LER	vii
KISALTMALAR VE S MGELER	xi
TABLOLAR L STES	xiv
EK LLER L STES	XV

1	1

1. BÖLÜM

TEMEL KAVRAMLAR

1.1. Faz Dönü ümlerin ve Denge	3
1.2. Alt So umalar	6
1.2.1. Kinetik Alt So uması	9
1.2.2. Çözünürlük Alt So uması	10
1.2.3. E rilik Alt So uması	
1.3. Çekirdeklenme	11
1.4 Sertlik ve Sertlik Ölçme Yöntemleri	

1.4.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi	
1.4.2. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi	
1.4.3. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi	
1.4.4. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi	
1.5. Çekme-Dayanımı	
1.6. Elektriksel Özdirenç	23
1.7. Isısal Ölçümler	

BÖLÜM 2

KATILA TIRMA ÜZER NE YAPILAN ÇALI MALAR

2.1. Ala ımların Katıla tırılması	.29
2.1.1. Ala ımların Düzlemsel Katıla tırılması	.31
2.1.2. Ala ımların Hücresel Katıla tırılması	.32
2.1.3. Ala ımların Ötektik Katıla tırılması	.34
2.2. Ötektik Yapıların Sınıflandırılması	.38
2.2.1. Normal Ötektikler	.41
2.2.2. Anormal Ötektikler	.41
2.3. Ötektik Katıla tırma ve Katkılama Maddeleri Üzerine Yapılan Deneysel	
Çalı malar	.43
2.3.1. Mikroyapı Üzerine Yapılan Çalı malar	.45
2.3.2. Mikrosertlik Üzerine Yapılan Deneysel Çalı malar	.48
2.3.3. Çekme-Dayanımı Üzerine Yapılan Deneysel Çalı malar	.51
2.3.4. Elektriksel Özdirenç Üzerine Yapılan Deneysel Çalı malar	.53
2.3.5. Isısal Özellikler (Entalpi ve Öz Isı) Üzerine Yapılan Deneysel	
Çalı malar	.55

3. BÖLÜM

DENEYSEL S STEMLER VE DENEYLER N YAPILI I

3.1. Giri	i	58
-----------	---	----

3.2. Döküm ve Katıla tırma Sistemleri	58
3.2.1. Vakumlu Eritme Fırını	
3.2.2. Döküm Fırını	60
3.2.3. Kontrollü Katıla tırma Fırını	62
3.2.3.1. Isıtıcı Sistem	62
3.2.3.2. So utucu Sistem	63
3.2.3.3. Sürücü Sistem	63
3.3. Kontrollü Katıla tırma Deneyinin Yapılı 1	65
3.3.1. Numunenin Hazırlanması	65
3.3.1.1. Numune Potası, Alt-Üst Destek ve Koruyucu Yapımı	65
3.3.1.2. Numune Kalıbının Hazırlanması	67
3.3.1.3. Ala ımların Dökümlerinin Yapılması	68
3.3.1.4. Termal Çift Seçimi ve Sıcaklık Ölçümleri	69
3.3.2. Kontrollü Katıla tırma Deneyi	71
3.3.2.1. Sıcaklık Gradyenti ve Katıla tırma Hızının Ölçülmesi	73
3.3.3. Metalografik lemler	75
3.3.3.1. Numunelerin Kesilmesi	75
3.3.3.2. Numunelerin Zımparalanması	76
3.3.3.3. Numunelerin Parlatılması	77
3.3.3.4. Numunelerin Da lanması	80
3.3.4. Mikroyapıların Gözlenmesi	81
3.4. Mikrosertli in Ölçülmesi	82
3.5. Çekme-Dayanımının Ölçülmesi	83
3.6. Elektriksel Özdirencin Ölçülmesi	84
3.6.1. ki Nokta Kontak Metoduyla Özdirenç Ölçme Yöntemi	84
3.6.2. Dört Nokta Kontak Metotları	85
3.7. Entalpi ve Öz Isı Ölçülmesi	88

4. BÖLÜM

SONUÇ VE TARTI MA

4.1. Deneysel Sonuçlar	90
------------------------	----

4.1.1. Mikroyapıların Gözlenmesi	90
4.1.2. Fazların Kimyasal Bile imlerinin Belirlenmesi	96
4.1.3. Mikroyapıların Ölçülmesi	103
4.1.4. Mikrosertlik De erlerinin Ölçülmesi	107
4.1.5. Çekme-Dayanımı De erlerinin Ölçülmesi	110
4.1.6. Elektriksel Özdirenç De erlerinin Ölçülmesi	113
4.1.7. Erime Sıcaklı 1, Entalpi ve Öz Isı De erlerinin Ölçülmesi	117
4.2. Tartı ma	118
4.2.1. Katıla tırma Hızı ve Mikroyapının Fiziksel Özelliklere Etkisi	118
4.2.2. Katkılama Elementlerinin Fiziksel Özelliklere Etkisi	125
4.3. Ara tırma Sonuçları	126

KAYNAKLAR	
EKLER	142
EK 1. Literatür Bilgisi	142
EK 2. Literatür Bilgisi	143
EK 3. Deneysel Ba intilar	144
ÖZGEÇM	

KISALTMALAR VE S MGELER

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
C_o	Ala 1mın ba langıç bile imi	(% a .)
C_s	Ala 1min sıvı bile imi	(% a .)
C_k	Ala 1min katı bile imi	(% a .)
G	Sıcaklık gradyenti	(K/m)
G_s	Sıvının sıcaklık gradyenti	(K/m)
G_k	Katının sıcaklık gradyenti	(K/m)
V	Katıla tırma hızı	(m/s^2)
}	Lamelsel mesafe	(m)
} _V	Lamelsel ötektik mesafe	(m)
Х	Gibbs-Thomson katsayısı	(K.m)
<i>a</i> .	A ırlık olarak	
at.	Atomik olarak	
Т	Sıcaklık	(K)
T_e	Erime Sıcaklı 1	(K)
T_I	Arayüzey Sıcaklı 1	(K)
G	Gibbs serbest enerjisi	(J)
UG	Gibbs serbest enerjisi de i imi	(J)
UG_v	Birim hacim ba ına dü en serbest enerji	(J)
g	Molar Gibbs serbest enerjisi	(J/mol)
G_s	Sıvının Gibbs-serbest enerjisi	(J)
G_k	Katının Gibbs-serbest enerjisi	(J)
E	Sistemin iç enerjisi	(J)

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
Н	Entalpi	(J)
H_k	Katının entalpisi	(J)
H_s	Sıvının entalpisi	(J)
L	Erime gizli 18181	(J)
UT	Alt so uma	(K)
UT_k	Kinetik alt so uması	(K)
UT_s	Çözünürlük alt so uması	(K)
UT_r	E rilik alt so uması	(K)
k	Da 111m katsayısı	
U	Lamelsel yapı için boyutsuz parametre	
m_s	Sıvılık e risinin e imi	(K / % at)
N_L	Toplam lamel sayısı	
X	Lamellerin toplam geni li i	(m)
Р	Peclet sayısı	
r	Korelasyon katsayıları	
r	E rilik yarıçapı	(m)
<i>r</i> *	Kritik yarıçap	(m)
\dagger_{ks}	Katı-sıvı arayüzey enerjisi	(J/m ²)
†	Maksimum gerilme de eri	(N/mm ²)
AK	Akma Dayanımı	(N/mm^2)
0	Orantılı Dayanım	(N/mm^2)
A_{ks}	Katı-sıvı arayüzey alanı	(m ²)
п	Atom sayısı	
S	Entropi	(J/K)

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
S_k	Katı Fazın Entropisi	(J/K)
S_s	Sıvı Fazın Entropisi	(J/K)
US	Birim hacim ba ına dü en entropi de i imi	(J/m^3K)
D_s	Sıvı içindeki çözünenin da ılım katsayısı	
Κ	Sistem parametresi	
A	Alan	(m ²)
F	Kuvvet	(N)
Р	Basınç	(N/m ²)
С	De i en yük derecesi	(N)
V	Hacim	(m ³)
}	Hücre geni li i	(m)
}	Lamellerarası mesafe	(m)
r	A bile enince zengin faz	
S	B bile enince zengin faz	
<i>k</i>	Katının yo unlu u	(kg/m^3)
<i>s</i>	Sıvının yo unlu u	(kg/m^3)
	Elektriksel özdirenç	(m)
I _{hom}	Homojen çekirdeklenme hızı	(atom/s)
I _{het}	Heterojen çekirdeklenme hızı	(atom/s)
HB	Brinell sertli i	(kgf/mm ²)
HR	Rockwell sertli i	(kgf/mm ²)
HK	Knoop sertli i	(kgf/mm ²)
HV	Vickers sertli i	(kgf/mm ²)
H_o	Malzemenin ilk sertlik de eri	(kg/m^2)

<u>Sembol</u>	Anlamı	<u>Birimi</u>
D	Baskı küresinin yarıçapı	(m)
d	zin çapı	(m)
L	zin eksenel uzunlu u	(m)
UL	Anlık Deformasyon Miktarı	(m)
L_0	Ba langıç Uzunlu u	(m)
V	Uzama Miktarı	(m)
C_{p}	Düzeltme faktörü	
g	Yer çekim ivmesi	(m/s ²)
d	Sürüklenme Hızı	(m/s)
<i>v</i> (V)	Durum yo unlu u	
е	Elektronların Enerjisi	(eV)
	ki Çarpı ma Arasında Geçen Süre	(sn)
	Elektriksel letkenlik	$(\Omega^{-1}m^{-1})$
m	Elektronların Kütlesi	(gr)
j	Akım Yo unlu u	(A/mm^2)
Ε	Elektrik Alan	(m/s)
0	Artık Direnç	(Ωm)
Т	Toplam Özdirenç	(Qm)
n	Elektron Sayısı	
l	Serbest Yol	(m)
R	Direnç	(Ωm)
V	Potansiyel	(volt)
Ι	Akım	(Amper)
$C_{\rm p}$	Öz Isı	(J/gK)

<u>Sembol</u>	Anlamı	<u>Birimi</u>
Q	Isı De i imi	(K)
0	Isitma Hizi	(K/dk)
С	Celcius Derece	(santigrat)
К	Kelvin	(Kelvin)
Ö	Ötektik Bile im	
T _ö	Ötektik Sıcaklık	(Kelvin)
$C_{\ddot{o}}$	Ötektik Bile im	

TABLOLAR L STES

Tablo 2.1.	Alüminyum esaslı ala ımlarda katıla tırma üzerine yapılan bazı
	çalı malar ve elde edilen ba ıntılar47
Tablo 2.2.	Mikrosertlik üzerine yapılan çalı malar ve elde edilen ba ıntılar
Tablo 2.3.	Çekme-dayanımı üzerine yapılan çalı malar ve elde edilen ba ıntılar 52
Tablo 2.4.	Elektriksel özdirenç üzerine yapılan çalı malar ve elde edilen ba ıntılar. 54
Tablo 2.5.	Öz 1sı ve entalpi üzerine yapılan deneysel çalı malar
Tablo 3.1.	Parlatmada kullanılan çözelti ve kuma lar
Tablo 4.1.	Al-%12,6Si-X (X=%2Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala 1m sistemlerinin
	farklı katıla tırma hızlarında büyütülen numunelerin fleykler arası
	mesafeleri, mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel özdirenç
	de erleri105
Tablo 4.2.	Ala ımların katıla tırma deneylerinden elde edilen veriler ve ba ıntılar106
Tablo 4.3.	Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala 1m sistemlerine ait
	farklı katıla tırma hızı ve fleykler arası mesafelerinin mikrosertlik de erleri
	arasındaki ba ıntılar108
Tablo 4.4.	Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala 1m sistemlerine ait
	farklı katıla tırma hızı ve fleykler arası mesafelerinin çekme-dayanımı
	de erleri arasındaki ba ıntılar112
Tablo 4.5.	Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala 1m sistemlerine ait
	farklı katıla tırma hızı ve fleykler arası mesafelerinin elektriksel özdirenç
	de erleri arasındaki ba ıntılar116
Tablo 4.6.	Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala 1m sistemlerine ait 1s1
	akı 1-sıcaklık e rilerinden elde edilen veriler118
Tablo 4.7.	Alüminyum esaslı ala ımlarda katıla tırma üzerine yapılan çalı malar ve
	elde edilen ba ıntılar

Tablo 4.8.	Mikrosertlik üzerine yapılan bazı çalı malar ve elde edilen ba ıntılar	121
Tablo 4.9.	Çekme-dayanımı üzerine yapılan bazı çalı malar ve elde edilen	
	ba ıntılar	122
Tablo 4.10.	Elektriksel özdirenç üzerine yapılan bazı çalı malar ve elde edilen	
	ba ıntılar	123
Tablo 4.11.	Entalpi ve öz 1s1 de erleri üzerine yapılan bazı çalı malar	124

EK LLER L STES

ekil 1.1	Katı ve sıvı fazların serbest enerjilerinin sıcaklıkla de i imi4
ekil 1.2.	Yarı kararlı denge durumundan, kararlı denge durumuna geçi5
ekil 1.3.	Zamana ba lı sıcaklık de i imi ve alt so uma7
ekil 1.4.	Ala ımların katıla tırılmasında yapısal alt so uma (a) Katı-sıvı arayüzeyi,
	(b) Katı-sıvı arayüzey önündeki çözünence zengin bölge,
	(c) Yapısal olarak alt so uma8
ekil 1.5.	Çözünürlük alt so umasına neden olan faktörlerin ematik gösterimi10
ekil 1.6.	Sıvı-katı parçacıkları olu tu unda arayüzey12
ekil 1.7.	Embriyonun serbest enerjisinin embriyo yarı çapına ba lılı 113
ekil 1.8.	Brinell sertlik ölçüm metodunun ematik gösterimi15
ekil 1.9.	Rokwell sertlik deneyi prensibi17
ekil 1.10.	Vickers sertlik ölçüm metodunun ematik gösterimi ve batıcı ucun
	numune yüzeyinde bıraktı 1 izin foto rafı18
ekil 1.11.	(a) Çekme-Dayanım test cihazının foto rafı, (b) Numune tutucu çenelerin
	foto raf1
ekil 1.12.	Çekme deneyinin ematik olarak uygulanması20
ekil 1.13.	Çekme-uzanım diyagramı21
ekil 1.14.	Alüminyum ala 1m1 için gerilim-gerinim e risi21
ekil 1.15.	Farklı oranlarda katkılanmı iki metal numunesinin özdirençleri26
ekil 2.1.	De i ik malzemelerde gözlenen farklı mikroyapılar
ekil 2.2.	kili sistemlerde denge faz diyagramı31
ekil 2.3.	Düzlemsel cephede katıla manın ematik gösterimi
ekil 2.4.	Düzlemsel katıla madan dentritik katıla maya geçi
ekil 2.5.	Hücresel katıla manın yapısının ematik gösterimi
ekil 2.6.	ki bile enli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı olu umu35

	••							
ekil 2.7.	Uc bile	enli ötektik	sisteme	ait faz	divagrami	ve mikrovapı	olu ı	1

- ekil 2.9. Do rusal katıla tırılmı ötektik ala ımlara ait farklı yapılar (a)Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), düzlemsel arayüzey,
 - (b) Düzlemsiz/ Düzlemsiz (Nf/Nf), e risel arayüzey,
 - (c) Düzlemsiz/Düzlemli (Nf/F), düzlemsel arayüzey,
 - (d) Düzlemsiz/Düzlemli (Nf/F), e risel arayüzey,
 - (e) Düzlemli/Düzlemli (F/F), düzlemsel arayüzey,
 - (f) Düzlemli/ Düzlemli (F/F), e risel arayüzey40

- ekil 3.4. (a) Grafit potanın foto rafı, (b) Grafit potanın ematik gösterimi...........65

- ekil 3.9. Numunelerin sıcaklıklarının ölçülmünde kullanılan K-tipi termal çiftler 70

ekil 3.10.	Sıcaklık de i imlerinin kaydedilmesinde kullanılan Pico TC-08 model
	sıcaklık kaydedicisi71
ekil 3.11.	Deney sisteminin ematik gösterimi72
ekil 3.12.	Numunelerin farklı hızlarda katıla tırılmasını sa layan senkronize hız
	motorları74
ekil 3.13.	Numune kalıbının olu turulmasından epoksi-resin ile kalıplanması
	sürecine kadar her bir a amanın gösterimi76
ekil 3.14.	Kesme robotu ile kesilmi numunedeki yüzey durumu (A, B, C tabakaları)
	zımparalama i lemiyle olu an ekil de i ikliklerini D ise orijinal iç yapıyı
	göstermektedir77
ekil 3.15.	Otomatik parlatma robotu78
ekil 3.16.	Numunelerin parlatılmasında kullanılan (a) Kuma lar ve
	(b) Süspansiyonlar79
ekil 3.17.	Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) foto rafı (a) Dı tan görünü,
	(b) çten görünü81
ekil 3.18.	(a) Mikrosertlik ölçüm cihazının foto rafı, (b) Numune üzerinde cihazın
	bıraktı 1 izin detayları
ekil 3.19.	Çekme-dayanımı ölçüm cihazının foto rafı
ekil 3.20.	ki-problu metotla özdirenç ölçme devresi
ekil 3.21.	Dört nokta kontak ölçme sisteminin emasi
ekil 3.22.	Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan düzenek foto rafı
ekil 3.23.	Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı
ekil 4.1.	Do rusal katıla tırılmı Al-12,6Si-2Cu ala ımının sabit sıcaklık gradyenti
	(G=7,78 K/mm) ve farklı katıla tırma hızlarında olu an mikroyapılarının
	enine kesitlerinden alınan SEM foto rafları. a) V=8,25µm/s, b) V=41,64
	μm/s, c) V=165,4 μm/s91

- ekil 4.2. Do rusal katıla tırılmı Al-12,6Si-2Co ala ımının sabit sıcaklık gradyenti (G=7,59 K/mm) ve farklı katıla tırma hızlarında olu an mikroyapılarının enine kesitlerinden alınan SEM foto rafları. a) V=8,35µm/s, (b) V=41,6 µm/s, (c) V=166,3 µm/s.....92

- ekil 4.5. Do rusal katıla tırılmı Al-12,6Si-2Bi ala ımının sabit sıcaklık gradyenti (G=9,20 K/mm) ve farklı katıla tırma hızlarında olu an mikroyapılarının enine kesitlerinden alınan SEM foto rafları. a) V=8,35 μm/s, b) V=41,5 μm/s, c) V=165,5 μm/s.
- ekil 4.7. Al-Si-Co ala ımının kimyasal bile im analizi (EDX)......99
- ekil 4.9. Al-Si-Sb ala ımının kimyasal bile im analizi (*EDX*)......101
- ekil 4.10. Al-Si-Bi ala ımının kimyasal bile im analizi (EDX)......102
- ekil 4.11. Fazlar arası mesafelerinin gösterimi (boyuna kesit) 103
- ekil 4.12. Ala ımlarda fleykler arası mesafelerin ölçümü,
 - (a) Geni bölge görüntüsü (enine kesit),
 - (b) Dar bölge görüntüsü (enine kesit).104

ekil 4.13.	Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri için sabit sıcaklık
	gradyentinde fleykler arası mesafelerin katıla tırma hızı ile de i imi 106

GR

Eski ça lardan beri insano lu, hayatını devam ettirebilmek ve kolayla tırmak için kullanaca 1 araç ve gereçleri geli tirme çabası içinde olmu tur. Geli en bilim ve teknolojiye paralel olarak, yüksek fiziksel ve kimyasal özellikli malzemelere duyulan gereksinim, insano lunu farklı arayı lara yöneltmi ve bu arayı lar çerçevesinde metal eriyikleri birbirleri ile karı tırılarak metal ala ımları elde edilmi tir. Ala ım, iki veya daha fazla elementin belirli bir sıcaklık, basınç ve bile imde eritilmesiyle elde edilen yeni bir katı çözeltidir. Ala ımlar, ala ım tipine ba lı olarak kendisini olu turan elementlerin özelliklerini ta 1yabilece i gibi, bu elementlerin özelliklerinden ba ka yeni özellikler de ta 1yabilirler. Ala ımlar saf metallere göre birçok açıdan üstün özelliklere sahiptirler [1]. Fakat, bilim ve teknolojinin yirminci yüzyıldaki hızlı ilerleyi i ile özellikle otomotiv, uçak, haberle me vb. endüstri dallarındaki geli meler, fiziksel, kimyasal, elektriksel ve manyetik özellikleri yüksek malzemelere ihtiyaç duyulmasına neden olmu tur. Ba langıçta iki metalin karı ımıyla elde edilen ala ımlar, sonra üç veya daha fazla metalin karı tırılması ile elde edilmeye ba lanmı tır [1-11].

Hemen hemen bütün metalik malzemeler üretimleri a amasında sıvı durumda olurlar. Sıvı durumdan katı duruma geçi ; di er bir ifadeyle katıla tırma olayı, malzemenin erime sıcaklı ının altına dü ülmesi ile gerçekle tirilir. Katıla tırma esnasında malzemede kusurlar meydana gelebilir. Dolayısı ile katıla tırma i leminin iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Özellikle metallerin katıla ması sırasında kristallerin olu um ekli, boyutları ve yönelimi do rudan malzemenin yapısını ve özelliklerini etkilemektedir.

Günümüzde ala ımların katıla tırılması genellikle tek kristallerin büyütülmesinde, malzemelerin safla tırılmasında ve malzemede homojen bile im elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu tür katıla tırmaların en önemli ticari uygulamaları yarı iletken kristallerin büyütülmesi, oksit lazer sistemleri, ısıya ve zora dayanıklı savunma sistemleri ve optik uygulamalar için kristallerin büyütülmesidir. Czochralski kristal büyütme yöntemi [12], bölgesel arıtma metodu [13] ve Bridgman do rusal katıla tırma yöntemi [14] günümüzde yaygın olarak kullanılan kristal büyütme yöntemleridir.

Ala ımlar, kontrollü olarak do rusal katıla tırılırken, sıcaklık gradyenti (*G*), büyütme hızı (*V*), malzemenin bile imi (C_0) gibi farklı büyütme artlarında katıla tırılmaktadır. Birbirinden ba ımsız olarak kontrol edilebilen bu parametreler "*katıla tırma parametreleri*" olarak bilinir. Katıla tırılan malzemeler mikroyapıları incelendi inde ötektik, peritektik, monotektik, dentritik gibi yapılarda gözlenmi tir [15-18]. Bu katıla ma türlerinden en çok inceleneni ve üzerinde çalı ma yapılanı ötektik mikroyapılardır. Ötektik ala ımlar nispeten dü ük erime sıcaklı ına, iyi akı kanlı a ve mekanik özelliklere sahiptirler. Katıla tırma parametrelerine ba lı olarak, kontrollü katıla tırılan ötektik malzemenin } (mikroyapı parametresi) de eri ve buna ba lı olarak maddenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin de i ti i gözlenmi tir [19-21].

Kontrollü katıla tırma yöntemi ile ala ımların mikrosertli i (HV), çekme-dayanımı (σ) gibi bazı mekanik özellikleri katıla tırma parametrelerine ba lı olarak iyile tirilebilmektedir. Bununla beraber do rusal katıla tırılan ala ımların mekanik özelliklerinin iyile tirilmesi sıcaklık gradyenti, katıla tırma hızı gibi parametrelere ba lı olmasının yanında katıla tırılan ala ımın içerdi i elementler veya sonradan yapılan katkılamalar ile de yakından ili kilidir. Do rusal olarak katıla tırılan ala ımların mikroyapılarının artan katıla tırma parametrelerine ba lı olarak azalttı ı, bunun sonucunda da ala ımın bazı mekanik özelliklerinin (HV, σ) önemli ölçüde arttı ı bilinmektedir [22-26].

Bu tez çalı masında 1. Bölüm'de katıla tırma olayının daha iyi anla ılabilmesi için katısıvı faz dönü ümleri ve bu dönü ümlere etki eden parametreler ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Daha sonra malzemenin mekanik, elektriksel ve ısısal özellikleri hakkında temel bilgiler verilecektir. 2.Bölüm'de katıla tırma türleri hakkında kısa bilgiler verildikten sonra ötektik katıla tırma üzerinde durulacak, literatürde yapılan ötektik katıla tırma ve ötektik ala ım sistemlerine yapılan katkı malzemeleri ile ilgili yapılan çalı malar özetlenecektir. 3. Bölüm'de deneysel sistemler ve deneylerin yapılı ları anlatılacaktır. 4. Bölüm'de ise elde edilen sonuçlar verilecektir.

1. BÖLÜM

TEMEL KAVRAMLAR

1.1. Faz Dönü ümleri ve Denge

Malzeme biliminde "faz" kelimesi özellikleri ve bile imi kendi içerisinde homojen olan ve sistemim di er parçalarından fiziksel olarak ayrı an kısım olarak tanımlanır. E er saf bir elementten bahsediliyorsa, elementin katı, sıvı veya gaz halleri ifade edilir. Katı halde birden fazla kristal yapı sergileyebilen metal ve ala ımlarda ise faz kelimesi, malzeme içindeki farklı kristal yapıya sahip bölgeleri tanımlamaktadır. Dolayısıyla katı haldeki faz dönü ümleri, malzemenin kristal yapısında meydana gelen dönü ümlerdir. Bu dönü ümler ala ımın kompozisyonu, ortam basıncı, sıcaklık gibi birçok nedene ba lı olarak gerçekle ebilir.

Bir malzemenin belli bir sıcaklık ve basınç altında sahip olabilece i farklı faz seçeneklerinin bulunması halinde, bu malzemede faz dönü ümü gerçekle ebilir. Sıcaklıkla meydana gelen de i imlere ba lı olarak bir fazın farklı bir faza dönü mesinin temel nedeni, bu fazların enerjilerinin sıcaklı a ba lı olarak farklı ekilde de i im gösteriyor olmasıdır. Malzemenin sahip oldu u faz seçenekleri arasında, belli bir sıcaklık ve basınç altında en dü ük enerjiye sahip olan faz hangisiyse, sistem *kararlı* olarak da tanımlanan, en dü ük enerjili faz düzeninde bulunma e ilimi ta ımaktadır.

ekil 1.1'de sadece iki ayrı fazın bulundu u saf bir element için, fazların sahip oldu u enerjinin sabit basınç altında, sıcaklı a ba lı olarak nasıl de i ti i gösterilmektedir. Burada sıcaklı ın artmasıyla her iki fazın enerjisinin de azaldı 1 görülmektedir. Fakat, bu iki fazın enerjisi aynı e imde azalmadı 1 için, bu iki çizgi dönü üm sıcaklı 1 olarak gösterilen bir noktada kesi mektedir. Bu noktanın sol tarafında A fazı daha dü ük enerjiye sahipken, yani kararlı faz durumundayken, sa tarafında B fazı kararlı hale gelmektedir. Dolayısıyla sıcaklık, dönü üm sıcaklı ının altında veya üzerinde



ekil 1.1. Katı-sıvı fazların serbest enerjilerinin sıcaklıkla de i imi [27].

oldu unda, bu element dü ük enerjili duruma sahip olan fazda kalmaktadır. E er dü ük sıcaklıktan yüksek sıcaklı a do ru malzeme ısıtılıyorsa bu dönü üm A'dan B'ye do ru; sıcaklık yüksek de erlerden dü ürüldü ünde ise B'den A'ya do ru gerçekle mektedir.

ekil 1.1'de erime sıcaklı ının altında her ne kadar sadece A fazı kararlı olarak görünse de, bu durum dönü üm sıcaklı ının altında B fazının görünmeyece i anlamına gelmemektedir. ekil 1.1'deki duruma, denge ko ulları adı verilmektedir ve sadece kararlı fazların var oldu u ko ullarda geçerli olmaktadır. Do ada gerçekle en birçok süreç, bu ko ulların dı ında gerçekle mektedir. E er bir faz, en dü ük enerjiye sahip faz olmamasına ra men bir yapıda kendini gösteriyorsa, bu faz *yarı kararlı* olarak tanımlanır.

Isıtılan bir sıvı erime sıcaklı ı T_e 'nin altındaki bir T_I sıcaklı ına kadar so utulursa sıvı aniden katıya dönü memektedir. Uygun artlar altında saf metaller sıvı fazdan katı faza geçerken so utma hızına ba lı olarak erime sıcaklı ının altında katıla abilmektedir. [28-29]. Çünkü, ilk katı olu urken yeni bir katı-sıvı arayüzeyinin olu umu için büyük miktarda bir enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Sıvı fazdan katı faza geçen atomların $T=T_e$ - T_I kadar bir sıcaklık de i imine ihtiyaçları vardır. Bu sıcaklık dü mesi sırasında sıvıdaki atom veya moleküller katıya benzer bir yapıya sahip olan atom gruplarını (embriyo) olu turmak için bir araya gelmektedir. ekil 1.1'de gösterildi i gibi bir sistemde faz dönü ümünün olabilmesi için son durumun Gibbs serbest enerjisi G_2 'nin ilk durumun Gibbs serbest enerjisi G_1 'den küçük (G_2 - G_1 <0) olması gerekir. Yani Gibbs serbest enerjisindeki bu azalma katıla mada sürücü kuvvetin olu masına yol açar.

Sabit basınç ve sıcaklıkta bulunan yalıtılmı bir sistemin Gibbs serbest enerjisi minimum de erde ise klasik termodinamikte bu sistem dengede demektir. Bu durum, matematiksel olarak ifade edecek olursak,

$$(dG)_{T,P} = 0 \tag{1.1}$$

eklinde ifade edilebilir. ekil 1.2'de atomların da ılıma göre Gibbs serbest enerjileri verilmektedir.



ekil 1.2. Yarı kararlı denge durumundan, kararlı denge durumuna geçi [27].

ekil 1.2'de görüldü ü gibi B konumunda bulunan sistemin Gibss serbest enerjisindeki de i im minimumdur. Yani sistem *kararlı denge* durumundadır. A konumunda ise dG=0'dır. Fakat A durumunda sistemin Gibss serbest enerjisi mümkün olabilecek minimum de erden büyüktür. Böyle durumlara *yarı-kararlı denge* durumu denilmektedir. Kararlı denge durumu ile yarı kararlı denge durumu arasındaki geçi durumlarına ise *kararsız denge* durumları denir [27].

Katıla ma için gerekli olan serbest enerji de i im miktarı u ekilde elde edilebilir:

Sabit basınçta T sıcaklık aralı ında katı ve sıvı fazlar için Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla de i iminin lineer oldu u kabul edilir. Böylece Gibbs serbest enerjileri,

$$G_k = H_k - T S_k \text{ ve } G_s = H_s - T S_s \tag{1.2}$$

olur. Bu durumda,

$$\Delta G = G_k - G_s = H_k - H_s - T(S_k - S_s) = \Delta H - T\Delta S$$
(1.3)

yazılabilir. Burada *H* entalpiyi, *T* mutlak sıcaklı 1, *S* entropiyi, *k* ve *s* indisleri sırasıyla katı ve sıvı fazları göstermektedir. Saf bir maddenin faz dönü üm sıcaklı ında (yani T_e 'de), $G_k = G_s$ olaca ından $\Delta G = 0$ olur. Buna göre denklem (1.3)'den,

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_e} \tag{1.4}$$

yazılabilir. Burada ΔS entropi de i imidir. Sonuç olarak herhangi bir *T* sıcaklı ında Gibbs serbest enerjisindeki de i im (1.3) ve (1.4) denklemlerinden,

$$\Delta G \cong \Delta H - \frac{\Delta H T}{T_e} = \frac{\Delta H (T_e - T)}{T_e} = \frac{\Delta H \Delta T}{T_e} = \Delta T \Delta S \qquad (1.5)$$

olarak elde edilir. Denklem (1.5)'e sıvı fazdan katı faza dönü üm için hacimsel serbest enerji de i imi veya *sürücü kuvvet* denir [27]. Saf maddeler için erime sıcaklı ındaki entalpi de i imi, erime gizli ısısına e ittir, yani $\Delta H = L$ 'dir.

1.2. Alt So umalar

Herhangi bir maddenin katıla ması, T_e erime sıcaklı ında olmayıp erime sıcaklı ının altındaki bir T_I sıcaklı ında gerçekle ebilmektedir. Maddelerin erime sıcaklı ının altındaki bir sıcaklıkta katıla masının sebebi, çekirdeklenme olayının olması için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır (ekil 1.3).

Bu enerji, ΔT sıcaklık farkından sa lanmakta olup bu farka *alt so uma* denir [30]. Alt so uma, arayüzey e rili ine, sıvının bile imine ve atomların sıvıdan katıya geçmesi için gerekli olan enerji miktarına ba lıdır.

Katıla ma için gerekli olan toplam alt so uma,

$$\Delta T = T_e - T_I = \Delta T_k + \Delta T_s + \Delta T_r \tag{1.6}$$

olarak ifade edilmektir. Buradaki ΔT_k kinetik alt so uması, ΔT_s çözünürlük alt so uması ve ΔT_r ise e rilik alt so umasıdır.



ekil 1.3. Zamana ba lı sıcaklık de i imi ve alt so uma.

Arayüzeydeki düzlemsel cepheyi kararsız yapan sıcaklık de i iminin olu umu ekil 1.4'te görülmektedir. ekil 1.4.b'de gösterilen sıvı bile imi C_s , arayüzeyde maksimum iken, arayüzeyden uzakla tıkça azalır ve çözünence zengin bir sıvı tabakası olu turmaktadır. Çözünen miktarı azaldıkça sıvı sıcaklı 1 artaca ından, dengesel sıvıla ma (likudus) sıcaklı 1 arayüzeyden uzakla tıkça artmaktadır. ekil 1.4.c'de arayüzey sıcaklı 1, dengesel sıvıla ma sıcaklı ının üstündedir. Bu durum düzlemsel cephede kararlı bir katıla tırma için gerekli olan artı göstermektedir. E er bir karasızlık, düz bir arayüzeyde bir çıkıntı olu turursa (ekil 1.4) bu çıkıntı a ırı ısıtılmı ortam içerisinde bulunacak ve tekrar eriyecektir. Arayüzeyin hemen önündeki sıvının gerçek sıcaklı 1, sıvıla ma sıcaklı ının altında oldu undan arayüzeyde olu an bir

çıkıntı, a ırı so umu ortam içinde bulunaca ından katıla ma devam edecektir. Sıvıla ma sıcaklı ının altında bulunan bu sıvı a ırı so umu durumdadır ve bu olay *yapısal alt so uma* olarak adlandırılır [31].

Yapısal ifadesi, bile imdeki de i meden kaynaklandı ını ifade eder. Yapısal alt so uma teorisine göre, arayüzeyde olu an bir çıkıntı, kendisini a ırı so umu bir sıvı içerisinde bularak düzlemsel cephede bir kararsızlık meydana getirecektir. Arayüzeyde sıvı içerisinde çözünen bile im gradyenti,

$$\left(\frac{dC_s}{dx}\right)_{x=0} = -\frac{V}{D_s}C_s(1-k)$$
 (1.7)

e itli i ile verilmektedir [32]. Burada V, katı-sıvı arayüzeyinin ilerleme hızıdır. D_s , sıvı maddenin difüzyon katsayısı, C_s sıvı maddenin bile imi, k ise da ılım katsayısıdır.



ekil 1.4. Ala ımların katıla tırılmasında yapısal alt so uma [32], a) Katı-sıvı arayüzeyi, b) Katı-sıvı arayüzey önündeki çözünence zengin bölge, (c) Yapısal olarak alt so uma (C= Konsantrasyon, x= uzunluk).

Düzlemsel arayüzeyin denge oldu u kabul edilirse,

$$\left(\frac{dT_s}{dx}\right)_{x=0} = m_s \left(\frac{dC_s}{dx}\right)_{x=0} \tag{1.8}$$

e itli i yazılabilir. Arayüzeydeki sıvı içerisinde sıcaklık gradyenti,

$$G \ge \left(\frac{dT_s}{dx}\right)_{x=0} \tag{1.9}$$

de erine e it veya bu de erden daha büyük ise yapısal alt so uma yoktur [32].

 $C_k = kC_s$ durumunda,

$$\frac{G_s}{V} \ge -\frac{m_s C_k (1-k)}{k D_s} \tag{1.10}$$

yapısal alt so uma ifadesi elde edilir. Burada m_s sıvıla ma e imi, C_k katı fazın bile imidir. Bu durumda düzlemsel cephe kararlıdır [32]. Alt so uma olayında Gibbs serbest enerjisi, a ırı so utulmu bir sıvıda kararlı veya yarı kararlı fazlardan hangisinin olu abilece ini belirlemektedir.

1.2.1. Kinetik Alt So uması ($\bigcup T_k$)

Bütün maddelerde atomların katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçi lerini engelleyen bir enerji engeli vardır. E er bir madde erime sıcaklı ının altındaki bir sıcaklı a kadar so utulursa sıvıdan katıya geçen atomların sayısı katıdan sıvıya geçen atomların sayısından fazla olur. Bu durumda katı faz büyür, yani katıla tırma olur. Bu durumun aksine katıdan sıvıya geçen atomların sayısı sıvıdan katıya geçen atomların sayısı sıvıdan katıya geçen itomların sayısı sıvıdan katıya geçen itomların sayısı sıvıdan katıya geçen atomların sayısından daha fazla olursa sıvı faz büyür, yani erime olur. Atomların geçi lerini sürdürmeleri için gerekli olan bu alt so umaya *kinetik alt so uma* denir.

Bir katı-sıvı arayüzeyinde katı fazdan sıvı faza geçen atomların sayısı, sıvı fazdan katı faza geçen atomların sayısına e it ise katı-sıvı arayüzeyi dengededir. Dengedeki bir sistem ister saf olsun isterse çok bile enli bir sistem olsun kinetik alt so uma, $\Delta T_k = 0$ olur.

1.2.2. Çözünürlük Alt So uması $(\bigcup T_s)$

Çözünürlük alt so uması, katı-sıvı arayüzeyindeki sıvının bile imi ile sıvı içerisindeki herhangi bir noktanın bile im farklılı ından kaynaklanır. Çözünürlük alt so uması (ekil 1.5);

$$\Delta T_{s} = T_{e} - T_{1} = m_{s}(C_{o} - C_{s}) = m_{s}C_{o}(\frac{k-1}{k})$$
(1.11)

e itli i ile verilir [33]. Burada,

$$m_s = \tan \Gamma = \frac{\Delta T}{\Delta C} = \frac{T_e - T_I}{C_s - C_o}$$
(1.12)

olarak verilir. Burada T_e erime sıcaklı ı, T_I arayüzey sıcaklı ı, C_s sıvı içerisindeki herhangi bir noktanın bile imi, C_o e rili arayüzeydeki katının bile imi, m_s sıvıla ma e risinin e imi ve k da ılım katsayısıdır. Tek bile enli sistemler için (tek kristal büyütme) $C_o = C_s$ oldu undan k = 1'dir. Bu yüzden saf malzemeler için çözünürlük alt so uması $\Delta T_s = 0$ olur.



ekil 1.5. Çözünürlük alt so umasına neden olan faktörlerin ematik gösterimi [33].

Katı-sıvı arayüzeyi dengede ise sıvı içerisinde bile im gradyenti olmadı 1 için $\Delta T_s = 0$ olur [30]. Sonuç olarak; katı-sıvı arayüzeyinin denge durumunda toplam alt so uma sadece e rilik alt so umasına e ittir, yani $\Delta T = \Delta T_r$ olur.

1.2.3. E rilik Alt So uması $(\bigcup T_r)$

E rilik alt so uması genellikle Gibbs-Thomson alt so uması olarak da adlandırılır. Bu alt so uma katı-sıvı arayüzey e rili inden meydana gelmektedir. E risel bir arayüzeyin kimyasal ve mekaniksel dengesi göz önüne alınarak, e rilik alt so uması ΔT_r ,

$$\Delta T_r = \Gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \tag{1.13}$$

olarak verilir [30]. Burada X Gibbs-Thomson katsayısı, r_1 ve r_2 ise arayüzeyin e rilik yarıçaplarıdır. Küresel bir katı-sıvı arayüzeyinin e rilik yarıçapları $r_1=r_2=r$ oldu undan (1.13) denklemi,

$$\Delta T_r = \frac{2\Gamma}{r} \tag{1.14}$$

eklini alır. Silindirik katı-sıvı arayüzeyi için $r_1=r$ ve $r_2=z$ olaca ından (1.13) denklemi,

$$\Delta T_r = \frac{\Gamma}{r} \tag{1.15}$$

olur.

1.3. Çekirdeklenme

Katıla ma olayı, çekirdeklenme ve büyüme olmak üzere iki a amada gerçekle ir. Sıvı, erime sıcaklı ının altına kadar a ırı so utuldu unda, sıvı içerisindeki atomlar katıya benzer küçük bir bölge olu turabilmek için bir araya gelirler. Bu olu an r yarıçapındaki küçük katımsı bölgeye *embriyo* (nucleus) denir. Embriyonun büyümesi ile toplam serbest enerji azalır ve r^* (kritik yarıçap) yarıçaplı katımsı bir parçacık olu ur. Bu katı parçacı a *çekirdek* denir ve bu olaya da *çekirdeklenm*e denir.


ekil 1.6. Sıvı-katı parçacıkları olu tu unda arayüzey [34].

Embriyo olu tu unda, toplam serbest enerji de i imi, hacim serbest enerjisinde azalma ve yüzey serbest enerjisinde ise bir artı gösterir. Böylece toplam serbest enerji,

$$\Delta G = -\frac{4}{3}f r^{3} \Delta G_{V} + 4f r^{2} \dagger_{ks}$$
(1.16)

eklinde verilir [34]. Burada 4/3 r^3 , yarıçapı r olan küresel embriyonun hacmidir. 4 r^2 kürsel embriyonun yüzey alanıdır, $_{ks}$ katı-sıvı arayüzey enerjisidir. G_V katının birim hacim ba ına dü en hacimsel serbest enerjisindeki de i imdir. G negatif de i en embriyonun serbest enerjisindeki de i imdir. Serbest enerjideki de i iklik, embriyonun boyutuna ba lıdır (ekil 1.7). Embriyo küçük ise, yani $r < r^*$ ise, embriyonun daha fazla büyümesi serbest enerjinin yükselmesine neden olabilecektir.

Büyüme yerine embriyo tekrar erir ve serbest enerjisinin azalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden metal sıvı kalır. Sıvı, denge katıla ma sıcaklı ının altında bulundu u için alt so uma olmu olacaktır. Gerçek sıvı sıcaklı ı ile denge katıla ma sıcaklı ı arasındaki fark *alt so umadır*. Sıcaklık, denge katıla ma sıcaklı ının altında oldu u halde çekirdeklenme henüz olu mamı tır ve büyüme ba layamaz. E er, embriyo kritik çekirdek yarıçapından (r*) büyükse, embriyonun boyutu arttı ında toplam enerji azalır. Olu an katı kararlıdır ve *çekirdeklenme* olu mu tur [34]. Artık çekirdek olarak katı parçasının büyümesi ba lamı tır. Çekirdeklenme, ancak yeterli sayıdaki atomun kendili inden katı üretmek için kümele ti inde ve bu katının çapı kritik çaptan büyük oldu unda olu maktadır. Bu durumda, kritik yarıçap, toplam serbest enerji de i im e risi üzerinde maksimum noktaya kar ılık gelir.



ekil 1.7. Embriyonun serbest enerjisinin embriyo yarı çapına ba lılı 1 [35].

1.4. Sertlik ve Sertlik Ölçme Yöntemleri

Sertlik, dayanım ve a ınma direncine ba lı bir özelliktir. Bir malzemenin yüzeyine batırılan bir cisme, malzemenin gösterdi i dirence o malzemenin *sertli i* denir. Malzemeler üzerinde yapılan en genel deney, sertli inin ölçülmesidir. Bunun ba lıca sebebi, deneyin basit olu u ve di erlerine oranla numuneyi daha az tahrip etmesidir. Di er avantajı ise, bir malzemenin sertli i ile di er mekanik özellikleri arasında paralel bir ili kinin bulunmasıdır [36-38]. Örne in çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik ile do ru orantılıdır; dolayısıyla, yapılan basit sertlik ölçmesi neticesinde malzemenin mukavemeti hakkında bir fikir edinmek mümkündür. Ayrıca, sert malzemelerin içyapıları düzensiz ve gerginlikli oldu undan, elektriksel iletkenlikleri de dü üktür. Bu bakımdan malzemelerin sertlikleri ile iletkenlikleri arasında da yakın bir ili ki vardır [39-41].

Sertlik ölçme genellikle, konik veya küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasına kar 1 malzemenin gösterdi i direnci ölçmekten ibarettir. Uygun olarak seçilen sert uç, tatbik edilen bir yük altında malzemeye batırıldı ında malzeme üzerinde bir iz bırakacaktır. Genel deyimle malzemenin sertli i, bu izin büyüklü ü ile ters orantılıdır.

Günümüzde laboratuarlarda uygulanan sertlik ölçme yöntemleri unlardır:

- a) Brinell sertlik ölçme yöntemi,
- b) Rockwell sertlik ölçme yöntemi,
- c) Vickers sertlik ölçme yöntemi,
- d) Knoop sertlik ölçme yöntemidir.

1.4.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu deney prensip olarak sertle tirilmi çelik veya tungsten karbürden yapılmı bir bilyenin belirli bir yük ile malzeme yüzeyine bastırılarak malzeme yüzeyinde olu an izin çapının ölçülmesi esasına dayanır. Brinell sertlik de eri;

$$HB = \frac{Uygulanan \ y\ddot{u}k \ (kgf)}{z \ y\ddot{u}zeyi \ (mm^2)}$$
(1.17)

$$HB = \frac{2F}{fD(D - \sqrt{(D^2 - d^2)})} \quad (kgf / mm^2)$$
(1.18)

eklinde ifade edilir [42].

Burada F (kg) uygulanan yük ve *D*; baskı küresinin çapı, *d*; numune üzerinde olu an izin çapıdır. Brinell sertlik de erinin birimi kg/mm² olarak ifade edilir. Standart deney artlarına göre bilye çapı 10 mm ve uygulama süresi 10–15 saniye arasında de i ir. Ancak bazı durumlarda çapları 10 mm'den daha küçük olan (örne in 1,25, 2,5, ve 5 mm) bilye biçimindeki uçlarda kullanılabilir (ekil 1.8). Malzemenin üzerine uygulanacak yük de eri sertli i ölçülecek malzemenin cinsine ve bilye çapına göre seçilmektedir. d/D = 0,2 – 0,7 oranı sa landı 1 durumlarda uygulanan yük de eri do ru kabul edilir. Deneyi yükünün saptanmasında F=CD² ba ıntısı kullanılır. Burada F deney yükü, C malzeme cinsine göre de i en yükleme derecesidir.



ekil 1.8. Brinell sertlik ölçüm yönteminin ematik gösterimi.

- Çelik dökme demir malzemesi ve titanyum ala ımları için C=30,
- Hafif metal ala ımları, bakır, pirinç, bronz malzemeleri için C=10,
- Saf alüminyum, magnezyum, çinko, dökme pirinç malzemeleri için C=5
- Kur un, kalay, yumu ak metal malzemeler için C= 1,25 alınır.

Pratikte 10 mm çapındaki bilye için uygulanan yükler bakır, pirinç gibi metaller için 1000 kgf, dökme alüminyum için 500 kgf ve demir, çelik gibi sert metaller için 3000 kgf'dir [43].

Brinell sertlik ölçme yönteminin sa lıklı yapılabilmesi için unlara dikkat edilmelidir;

• Sertli i ölçülecek malzemenin kalınlı 1 minimum olarak iz derinli inin sekiz katı olmalıdır.

• Ölçüm yapılacak bölgenin kenardan uzaklı 1 minimum bilye çapının 2,5 katı kadar olmalıdır. Ayrıca iki iz arasında bilye çapının 4 katı kadar mesafe bırakılmalıdır.

- Sertlik ölçümünde en az üç ölçüm yapılarak aritmetik ortalama alınmalıdır.
- nce saçlar üst üste konularak ölçüm yapılmalıdır.
- Sertli i ölçülecek parçanın yüzeyi düz, parlatılmı olmalıdır. E er parlatma pratik olarak mümkün de ilse hassas isleme veya taslama yapılmı yüzeyler tercih edilebilir.

• Isıl i lem görmü parçaların yüzeyinden tala kaldırıldıktan sonra ölçüm yapılmalıdır.

1.4.2. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntemde standart bir batıcı uç genelde 10 kg gibi bir yük malzeme yüzeyine bastırılır. Olu an izin dip noktası ba langıç noktası olarak alınır. Daha sonra yük, yüksek bir de ere çıkartılıp tekrar önceki de erine indirilir. Uzun batma derinli inde meydana gelen artı a göre Rockwell sertlik (HR) de eri belirlenir. Bu yöntemde ön yük ve esas yük olmak üzere iki ayrı yük uygulanılır. Burada ön yükü uygulamadaki amaç parça yüzeyindeki düzgünsüzlüklerin ve dalma bölgesinde meydana gelecek uygunsuz deformasyonun ölçüm sonuçlarına olan etkisini ortadan kaldırmaktadır. Uygulanan yük sabit olup 10 kgf'dir. Bu yöntemde elmas koni ya da çelik bilye olmak üzere iki çe it batıcı uç kullanılır. Bilye tipindeki batıcı uçların çapları yakla ık 1,6 mm, 3,2 mm, 6,35 mm ve 12,7 mm olup elmas koninin tepe açısı 120° ve tepe noktası yarıçapı 0,2 mm olan bir küreden olu maktadır.

Rockwell sertlik de eri standart skalalardan birine göre ölçülür ve batma derinli ine kar ı gelen birimsiz bir sayı ile gösterilir. Bir malzemenin Rockwell cinsinden ölçülen sertlik de eri 100 rakamını a arsa batıcı uç olarak bilye kullanılmamalıdır. Benzer ekilde ölçülen sertlik de eri 20 rakamının altında ise batıcı uç olarak koni biçimindeki elmas uç tercih edilmemelidir. Rockwell sertlik skalalarından en fazla kullanılanları B ve C skaları olup B skalası dökme demiri, sertle tirilmi çelik, pirinç, bronz ve alüminyum ala ımlarının sertliklerinin ölçümünde, C skalası ise sertle tirilmi çelik ve karbürlerin sertliklerinin ölçümünde kullanılırlar [42-43]. Rockwell sertlik ölçme yönteminin sa lıklı yapılabilmesi için unlara dikkat edilmelidir:

- Yük parça yüzeyine dik uygulanmalıdır.
- Numune sa lam olarak temiz yüzeyli basma tepesine yerle tirilmelidir.
- Numunenin minimum kalınlı 1 kalıcı dalma derinli inin 10 katı olmalıdır.
- Ölçüm bölgesinin numune kenarından uzaklı 1 iz çapının 2,5 katı olmalı ve izler arası mesafe 3 iz geni li inde olmalıdır [43].

Rockwell sertlik deneyi ekil 1.9'da ematik olarak verilmi tir. Rockwell sertlik deneyi yapılırken numune üzerine önce 10 kg'lık bir ön yük (F_0) uygulanır. F_0 ön yükünün uygulanmasıyla t₀ derinli ine eri ilir. Bu konum sertlik skalası için referans düzlemi olarak alınır. Ön yükün uygulanmasından sonra farklı sertlik skalaları için verilen yük

miktarlarına varıncaya kadar bir ana yük (F_{ana}), yakla ık 10 saniye süreyle numune üzerine uygulanır [43-44].



ekil 1.9. Rockwell sertlik deneyi prensibi.

- Ön yüklemede (10 kg) ucun t₀
- Ana yüklemede (90 kg veya 140 kg) ucun batma derinli i t₁
- Ana yük kaldırıldı ında ucun batma derinli i t_b
- Rockwell sertli i (100 t_b)

1.4.3. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntem prensip olarak Brinell sertlik ölçme yöntemi ile benzerdir. Bu yöntemdeki tek fark batıcı uçtur. Vickers sertlik ölçme yönteminde 136° tepe açılı, tabanı kare olan elmas piramit batıcı uç kullanılır. Vickers sertlik ölçme deneyinin uygulanı 1 piramit seklindeki batıcı ucun malzemenin yüzeyine, malzemenin cinsine göre seçilen yük altında belli bir süre bastırılması sonucu olu an izin kö egen uzunluklarının (*d*) ölçülmesi eklindedir (ekil 1.10).

Vickers sertli i (HV)'de, Brinell sertli ine benzer ekilde, uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile belirlenir.

$$HV = \frac{2F\sin(\pi/2)}{gd^2} \ (kgf/mm^2)$$
(1.19)

Burada, F; uygulanan yük, g; yer çekim ivmesi, d ise $(d^2=d_1.d_2)$ izin alanıdır.

Vickers sertli i ile çok ince bölge veya tabakaların bile sertli i hassas bir ekilde ölçülebildi inden, mikrosertlik olarak da bilinir [43-44].

Vickers sertli inin avantajı, oldukça do ru okumalar yapması ve tüm metal ve i lem görmü yüzeyler için sadece bir tip batıcı ucun kullanılmasıdır. Vickers sertlik ölçme yöntemi metallerin yanı sıra seramik malzemelerin sertli inin ölçümünde kullanılabilmektedir.



ekil 1.10. Vikers sertlik ölçüm metodunun ematik gösterimi ve batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktı 1 izin foto rafı.

1.4.4. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi

Mekaniksel sertlik ölçme yöntemlerinden biri olan Knoop sertlik ölçme yöntemi, özellikle çok ince ve kırılgan malzemelerin mikrosertlik de erlerinin ölçülmesinde kullanılır. Bu yöntemde amaç, sertli i ölçülecek numune üzerinde sadece küçük bir iz bırakılmasıdır. Bir piramit elmas uç, belirli bir kuvvet ve süre kadar uygulanır. Sonuçta numune üzerinde ancak mikroskopla okunabilecek bir iz olu ur. Knoop sertli i *HK* ile gösterilir ve a a ıdaki formülle ifade edilir;

$$HK = \frac{Uygulanan Y \ddot{u}k}{z \text{ Alam}} = \frac{P}{C_p L^2} \qquad (kgf / mm^2)$$
(1.20)

Burada *L*; numune üzerindeki izin eksenel uzunlu u, C_p ; düzeltme faktörü (izin ekline ba lıdır ve genellikle 0,070279 de eri kullanılır) ve *P*; uygulanan yük miktarıdır.

HK genellikle 100'den 1000'e kadar de i en sertlik de erlerini alır. Bu metotla çok küçük boyutlu malzemelerin bile mikrosertlik de erleri ölçülebilmektedir. Bununla beraber numune üzerinde olu turulan izin boyutu ölçülürken mikroskobun kullanılmasının zor olması, numuneyi hazırlama ve iz uygulama i lemlerinin zaman alması bu metodun zorluklarındandır [45].

1.5. Çekme-Dayanımı

Çekme-dayanımı, malzemeye iki ucundan çekme kuvveti uygulanması sonucu kopmadan önceki malzemenin ula tı 1 maksimum gerilmeye denir. Çekme dayanımı deneyi numunenin tek eksende, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparılıncaya kadar çekilmesi i lemidir (ekil 1.11). Bu deney malzemenin dayanım deerleri hakkında esas tasarım bilgilerini saptamak ve malzemelerin mekanik özelliklere göre sınıflandırılmasını sa lamak amacıyla kullanılır. Malzemeye iki ucundan çekme kuvveti uygulanması sonucu kopmadan önceki ula tı 1 maksimum gerilmeye maksimum çekme dayanımı (UTS) adı verilir.

Malzeme artan dı zorlanmalar altında ekil de i tirir, sonra dayanımını yitirerek kopar. ekil 1.12.'de çekme-dayanımı deneyinin yapılı ı ematik olarak gösterilmektedir. Uzanım-yük e risi üzerinde görülen A noktası akma dayanımını, B noktası çekmedayanımını, C noktası ise kopma dayanımını göstermektedir.

Malzemenin çekilmesinden sonra elde edilen grafik yardımıyla çekme-dayanımı de eri belirlenir (ekil 1.13). Gerilme kuvvetiyle doru orantılı oldu undan diyagramda genel tanımlamaların yapılabilmesi için kuvvet yerine gerilme ifadesi kullanılır.



ekil 1.11. (a) Çekme-Dayanımı test cihazının foto rafı, (b) Numune tutucu çenelerin foto rafı.



ekil 1.12. Çekme deneyinin ematik olarak uygulanması [47].



ekil 1.13. Çekme-uzama diagramı [46].



ekil 1.14. Alüminyum ala 1m1 için gerilim-gerinim e risi [47].

ekil 1.14'de alüminyum ala ımı için gerilim-gerinim e risi gösterilmektedir

Malzemede olu an bütün de i ikliklerin kendine özgü deyimi vardır ve bunların bazıları u ekilde sıralanır:

Kopma dayanımı; Devamlı ve lineer fazlala an gerilme sonucu malzemenin koptu u gerilme büyüklü üne "*kopma dayanımı*" adı verilir ve ile gösterilir.

Akma dayanımı; Kuvvetin sabit kalmasına ra men kalıcı deformasyonun ba ladı 1 gerilmenin de erine "*akma dayanımı*" adı verilir ve $_{AK}$ veya $_{AK}$ ile gösterilir.

% 0,2 Uzama dayanımı; Kuvvetin sabit kalmasına ra men kalıcı deformasyonun% 0,2 oldu u gerilmenin de erine "% 0,2 uzama dayanımı" adı verilir ve $R_{p_{0,2}}$ ile gösterilir.

Orantılı dayanım; Devamlı ve lineer olarak fazlala an gerilme ile uzamanın birbirine oranının sabit kaldı 1 gerilme büyüklü üne "*orantılı dayanım*" adı verilir ve _o veya _o ile gösterilir.

Elastiklik modülü; Elastiklik modülü, orantılı mukavemette, gerilmenin uzamaya oranıdır.

Çekme-dayanımı †,

$$\dagger = \frac{F}{A} \tag{1.21}$$

e itli i ile hesaplanır ve birimi N/mm² veya MPa'dır. Burada, F çekme kuvveti, A ise malzemenin deformasyona u ramadan önceki kesit alanıdır. Deformasyon (uzama) miktarı V,

$$\mathsf{V} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L} \tag{1.22}$$

e itli i ile hesaplanır. Burada, ΔL anlık alınan deformasyon miktarı, L_0 ise ba langıç uzunlu udur. Bir malzemenin çekme-dayanımı ne kadar yüksek ise o malzeme çekilirken o kadar az süner veya ekil de i tirir. Çekme-dayanımı deneyi genellikle yuvarlak veya dikdörtgen kesitli çubuklar üzerinde yapılır.

1.6. Elektriksel Özdirenç

Elektriksel iletkenlik ve elektriksel özdirenç alanında ilk adım Thomson Edison'un elektronu ke fiyle yapılmı daha sonra Drude [48-49] ve Lorentz [50] tarafından ortaya atılan metallerde serbest elektron modeliyle yapılmı tır. Dı arıdan uygulanan bir elektrik alanı ile iletkenlik elektronlarının meydana getirdi i akım, elektronların örgü noktaları ile çarpı maları neticesinde bir dirençle kar ıla maktadır.

Dı arıdan uygulanan bir elektrik alanı (E) sıfır iken elektronlar sıcaklı a ba lı olarak hızı ile örgü noktaları arasında hareket etmektedirler. Bir elektrik alan uygulandı ında ise elektronlar E alanı do rultusunda \in_d ortalama sürüklenme hızı ile harekete zorlanmaktadır. Bu hız sıcaklı a ba lı olan hızdan çok daha küçük bir hızdır. Denge durumunda ise elektronların hızları artmamakta, elektrik alandan kazandıkları enerjiyi örgü noktalarının etkisi ile birbirleriyle çarpı arak harcamaktadırlar. Bu durumda akım yo unlu u,

$$j = 1/3e^2 E[v^2 \ddagger \in (\vee)]$$
(1.23)

eklinde, elektriksel iletkenlik ise,

$$j = \dagger E \tag{1.24}$$

olarak ifade edilir [51] ve *j* akım yo unlu u ile *E* elektrik alan arasındaki orantı faktörü olarak tanımlanmı tır. Bu durumda elektriksel iletkenlik ve özdirenç için,

† =
$$\frac{1}{3}e^2[v^2$$
t€(V)] (1.25)

$$\dots = \left[\frac{1}{3}e^2 \left[v^2 \ddagger \in \left(v\right)\right]\right]^{-1}$$
(1.26)

ifadeleri yazılabilir [51]. Burada v elektronun sürüklenme hızı, iki çarpı ma arasında geçen süre, $\in (v)$ fermi yüzeyine yakın elektronların durum yo unlu unu, v

elektronların enerjisini göstermektedir. Çok küçük sıcaklıklar dı ında deneysel olarak elde edilen özdirenç ya da onun tersi olan iletkenlik sıcaklı ın bir fonksiyonudur. Malzemenin yapısına sonradan ilave edilen safsızlıklardan ve yapısında bulunan örgü kusurlarından kaynaklanan dirence *artık direnç* denir ve \dots_0 ile gösterilir. \dots_0 artık direnci sıcaklıktan ba ımsızdır ve dü ük sıcaklıklarda var olur. Saf metaller ısıl i leme tabi tutulduklarında ise bu artık direnç oldukça küçük olmaktadır. Saf bir numuneden ölçülen dirençten \dots_0 artık direnci çıkartıldı ında bir direnç de eri elde edilmektedir ve bu de er tamamen sıcaklı ın bir fonksiyonudur. *deal direnç;* manyetik olmayan metallerden elde edilen sıcaklı a ba lı direnç de erleridir.

Elektronların birbirleriyle ve örgü titre imleriyle etkile melerinden kaynaklanan özdirenç T sıcaklı ında ..._i(T) eklinde gösterilir. Toplam özdirenç ise ..._T ile gösterilir ve sıcaklı a ba lı ve sıcaklıktan ba ımsız kısımlarının toplamına e ittir. Bu ise *Mattheissen kuralı* olarak bilinir ve

$$..._{T} = ..._{0} + ..._{i}(T) \tag{1.27}$$

eklinde ifade edilir.

Elektriksel iletkenlik † göz önüne alınarak ve (1.24) 'den yola çıkarak,

$$\dagger = \frac{ne^2}{m} \ddagger \tag{1.28}$$

yazılabilir. Burada *m* elektronun kütlesidir. Elektriksel özdirenç, iletkenli in tersi olarak tanımlanmaktadır. Buna göre, özdirenç ... ,

... =
$$m/(ne^2 \ddagger)$$
 (1.29)

ile ifade edilir. \in_f fermi yüzeyindeki hız olmak üzere iletim elektronlarının ortalama serbest yol uzunlu u,

$$l = \notin_f \ddagger \tag{1.30}$$

olarak alınırsa, metaller için ortalama serbest yol uzunlu unun çok uzun oldu u görülür. Özdirencin sıcaklı a ba lılı ını ifade eden ba ıntı,

... =
$$\left[2(3kmT)^{1/2}\right]/e^2nl$$
 (1.31)

olarak verilmektedir. Klasik teori, metallerin elektriksel özdirençlerinin ... $\approx T^{1/2}$ ile de i ti ini kabul etse de, geni bir sıcaklık alanını kapsayacak ekilde yapılan deneyler,

ba ıntısı ile uyum içerisinde oldu unu göstermektedir. Burada \dots_0 , T_0 referans sıcaklı ındaki iletkenin özdirencidir. Γ ise seçilen sıcaklık bölgesine uygun özdirencin sıcaklık katsayısıdır [52, 53].

Elektronların örgü fononlarıyla çarpı ması neticesinde olu an özdirenç ..._L ve iletkendeki katkı atomları ve kusurlarla elektronların çarpı ması neticesinde olu an özdirenç ..._i metalin elektriksel özdirencini meydana getiren iki önemli etkendir. Dü ük sıcaklıklarda fononların sayısı azalaca ından, bu sıcaklıklarda iletkendeki elektronların katkı atomları ve kusurlarla çarpı maların neticesinde olu an özdirenç olan ..._i etkin olurken, yüksek sıcaklıklarda fononlarla elektronların çarpı ması sonucu olu an ..._t etkin olmaya ba lar.

Farklı iki metalin 20 K altında elektrik özdirencinin sıcaklıkla de i imi, ekil 1.15'de verilmi tir. 0 K sıcaklı ındaki özdirençlerin farklı olmasının nedeninin iki numunedeki farklı katkı yo unlu u ve statik kusurlardan kaynaklandı 1 dü ünülmektedir.

Bir iletkenin direnci ise özdirencine ba lı olarak,

$$R = \dots l / A \tag{1.33}$$

eklinde verilir. Burada *l* iletkenin uzunlu u, *A* kesit alanı, ... ise özdirençtir. 1.28 e itli inden özdirenç de erini yerine koyarsak,

$$R = \frac{ml}{ne^2 TA} = \frac{V}{I} \tag{1.34}$$

olur. Burada V iletkenin iki ucu arasındaki potansiyel farkı ve I iletkenin üzerinden geçen akım iddetidir. Dolayısıyla V ve I bilinerek e itli in di er tarafındaki nicelikler ve özdirenç hesaplanabilir.

Sonuç olarak metallerde elektriksel özdirenç, iletkenlik elektronlarının elektrik alan do rultusundaki hareketleri esnasında safsızlıklardan (elektron-safsızlık), di er elektronlardan (elektron-elektron) ve örgü titre imlerinden (elektron-fonon) saçılmalarından kaynaklanmaktadır. Bu saçılmalarla ilgili geli tirilmi birçok teorik yakla ım mevcuttur. Bu yakla ımlar, dirence yukarıda bahsedilen saçılmalardan gelen katkılar hakkında yeterince bilgi vermektedirler [54].



ekil 1.15. Farklı oranlarda katkılanmı iki metal numunesinin özdirençleri [51].

1.7. Isısal Ölçümler (U*H*, *Cp*)

Spektroskopik analiz gibi, maddelerin kararlılı ını ve yapısını hesaplamak için birçok teknik kullanılır. Bu tekniklerde, yapıların do rulu u, maddelerdeki farklılıklar, meydana gelen de i imlerin (kimyasal de i imler, otokatalitik reaksiyonlar, çözücü reaksiyonlar, hidroliz ve fotolitik reaksiyonlar, faz de i imleri, yüzey alanındaki de i imler ve polimorfik de i imler) oranı, ne kadar oldu u ve olasılı ı ölçülebilir.

Kalorimetri, ısının ölçümü olarak tanımlanır ve 1870'ten bu yana reaktif sistemleri çalı mak için kullanılmaktadır. Elektronikteki ilerlemeler ve yeni cihazların geli tirilmesi ile kalorimetri ara tırma ve uygulamalarda maddelerin kimyasal ve fiziksel karakterizasyonu için yaygın bir ekilde kullanılan bir cihaz halini almı tır. Örne in polimerler, nükleer endüstri, kimyasal sistemler, seramikler, tekstil, tarım, gıda, metal gibi çe itli endüstri alanlarında, metal ala ımların faz geçi lerinde, metal hidrasyon kinetiklerinde, çözünmü alüminyumun çökelmesinde ve katı hal geçi lerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir.

Günümüzde 1sısal analizlerde diferansiyel analiz (DTA) ve diferansiyel tarayıcı kalorimetresi (DSC) yaygın olarak kullanılan metotlardır. DTA, DSC ile 750-1600⁰C arasındaki sıcaklıklardaki ölçümler için kullanılmaktadır. DTA karakteristik sıcaklıkların ölçümünde ve maddelerin nitel tanımlanmasında uygulanmaktadır.

DSC tekni inin altında yatan temel prensip numunenin ve referansın üzerindeki ısı akı 1 farkıdır. DSC testine tabi tutulan numune faz de i tirme gibi fiziksel bir dönü üme gidiyorsa referansla aynı sıcaklıkta tutabilmek için numuneden daha az veya daha çok ısı akı 1 olacaktır. Daha az veya daha çok ısı akı 1 i lemin endotermik (numunenin ısı alması) veya ekzotermik (numunenin ısı vermesi) olmasına göre de i ir. Örne in katı bir numune eriyip sıvı hale geçiyorsa referansla aynı oranda sıcaklık artı ına sahip olması için numune ısıtılmalı ve numuneden daha fazla ısı akı 1 gerçekle tirilmelidir. Bunun sebebi katı halden sıvı hale geçerken numune tarafından gerçekle tirilen ısı emilimidir. Numune ve referans arasındaki ısı akı de i imi kontrol edilerek DSC yöntemi ile hal de i imi sırasında yayılan veya emilen ısı miktarı ölçülebilir.

Sıcaklık-ısı akı ı grafi i malzemeler hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bilgilerden biri *Isı kapasitesi (ısı sı ası*)'dir. Isı kapasitesi bir maddenin sıcaklı ını 1°C de i tirmek için gerekli olan ısı miktarıdır ve *Joule/gram-kelvin* birimiyle ifade edilir.

DSC deneylerinden ısı akı ının zamana veya sıcaklı a göre çizilen e risi elde edilir. Numunedeki egzotermik reaksiyonlar deney yapmak için kullanılan ölçüm cihazlarında kullanılan farklı teknolojilere ba lı olarak negatif veya pozitif tepe noktası olarak gösterilir. Bu e ri hal de i imlerinin entalpilerini hesaplamak için kullanılabilir.

Entalpi de eri,

$$UH = A \ln (mJ) / K \ddot{u} t le (mg)$$
(1.35)

e itli inden hesaplanmaktadır. Denklem 1.35'den görüldü ü gibi entalpi, birim kütlenin erimesi için gerekli enerjidir. Burada Area (alan) olu an pikin sınırladı 1 alandır birimi mJ ve kütle ise cihazın içine yerle tirilen örne in mg cinsinden de eridir. Öz ısı ise,

$$C_{p} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{m \,\mathrm{S}_{o}} = \frac{dH}{dT} = \frac{\Delta H}{T_{pik}} \tag{1.36}$$

e itli inden hesaplanmaktadır. Burada, $S_o = dT/dt = 10$ K/dakika ısıtma hızı, dQ/dt heat flow (ısı akı 1, J/s veya watt), m kütle (de i ik miktarlarda) ve Area= üçgenin alanı=0,5 taban x yükseklik= 0,5 zaman x güç (numunenin erimesi için gerekli enerji) ile verilir.

Bir sonraki bölümde katıla tırma türleri ve ötektik katıla tırma hakkında bilgi verildikten sonra literatürde ötektik katıla tırma ve ötektik ala ım sistemlerine yapılan katkı malzemeleri üzerine yapılan çalı malar özetlenecektir.

2. BÖLÜM

KATILA TIRMA ÜZER NE YAPILAN ÇALI MALAR

Bu bölümde katıla tırma türleri hakkında kısa bilgiler verildikten sonra ötektik katıla tırma üzerinde durulacak, literatürde yapılan ötektik katıla tırma ve ötektik ala ım sistemlerine yapılan katkı malzemeleri ile ilgili yapılan çalı malar özetlenecektir. Ayrıca mikrosertlik, çekme-dayanım, elektriksel özdirenç, entalpi ve öz ısı ölçümleri hakkında literatürde yer alan çalı malar özetlenecektir.

2.1. Ala ımların Katıla tırılması

Malzemelerin mikroyapılarındaki de i iklikler (tanecik büyüklü ü, tane yönelimi) mekanik özelliklerini (mikrosertlik, çekme-dayanımı, basma dayanımı), elektriksel özelliklerini (elektriksel özdirenç) ve ısısal özelliklerini (termal iletkenlik, öz ısı) etkiledi i bilinmektedir. Malzemelerde düzenli mikroyapıların olu ması ve tanecik boyutları (}), bu malzemelerin katıla tırılması esnasındaki katıla tırma parametrelerine yani sıcaklık gradyenti *G*, katıla tırma hızı *V* ve ala ımın bile imi C_o 'a ba lıdır. Katıla tırma parametreleri *G*, *V* ve C_o birbirinden ba ımsız kontrol edilerek malzemelerin tanecik boyutundaki mikroyapılarına (ekil 2.1) ve mekanik özelliklerine etki etmek, kontrollü katıla tırma yöntemi ile mümkündür.

Bir ala 1m sistemi, iki veya daha fazla elementin belirli bir sıcaklık, basınç ve bile imde eritilmesiyle elde edilen yeni bir katı çözeltidir. Ala 1mlar, ala 1m tipine ba lı olarak kendisini olu turan elementlerin özelliklerini ta 1yabilece i gibi, bu elementlerin özelliklerinden ba ka yeni özellikler de ta 1yabilirler. Örne in saf bir metale ala 1m elementi ilave edilerek, onun mekanik özellikleri büyük ölçüde geli tirilebilmektedir [55-57]. Ala 1mlar, kendisini olu turan elementlerin birbiri içerisindeki karı 1mına göre tek fazlı ve çok fazlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Homojen bir sistemin fiziksel sınırlarla ayrılmı olan kısmına faz denir.

Birbiri içerisinde her oranda homojen olarak karı abilen ala ımlar, tek fazlı ala ımlardır. Böyle bir ala ım sistemindeki, ala ım elementlerinin örgü sistemlerinde bir de i iklik olur ve ala ım elementinden birinin atomları di erinin kristal örgüsüne yerle ir. Yeni örgüde farklı özelliklere sahip atomların bulunmasından dolayı farklılıklar olu ur ve yeni bir malzeme ortaya çıkar. Çok fazlı ala ımlarda, ala ımı olu turan elementlerin baskın özellikleri görülür ve örgü yapılarında bir de i iklik olmaz [57-60].



ekil 2.1. De i ik malzemelerde gözlenen farklı mikroyapılar.

Endüstride kullanılan metalik sistemler, yüksek sıcaklıklarda birbirini her oranda eritebilmelerine ra men, dü ük sıcaklıklarda sınırlı oranda eritebilmektedirler. ekil 2.2'de ikili bir ala ım sistemine ait faz diyagramı verilmektedir. Faz diyagramından da

görüldü ü gibi ala ım sistemi, sıvı halden so utulmaya ba latıldı ında (T_1 ile T_3 sıcaklık aralı ında) ala ım katı-sıvı karı ımında olurken, sıcaklık T_3 sıcaklı ının altına dü ürüldü ünde ise ala ım tamamen katı hale gelmektedir.



ekil 2.2. kili sistemlerde denge faz diyagramı [62].

2.1.1. Ala ımların Düzlemsel Katıla tırılması

Ala ımların düzlemsel cephede kontrollü olarak katıla tırılması pratikte tek kristallerin büyütülmesinde, malzemeleri safla tırmada ve kontrollü büyütülen malzemede homojen bile im elde etmede kullanılır. Bu tür katıla tırmanın en önemli ticari uygulaması, yarıiletken kristallerin büyütülmesi, oksit lazer sistemleri ve optik uygulamalar için büyütülmesidir.

Metal-metal ala ımların düzlemsel cephede katıla tırılmı kristallerini inceleme, ara tırmalarda çok geni yer tutmaktadır. Birçok metalin ve metal olmayan inorganik

eriyiklerin katıla tırılması esnasında arayüzeyin dengede oldu unun kabul edilmesi iyi bir yakla ıklıktır. Yani katıla tırma esnasında, katı-sıvı arayüzeyinin önünde büyük bile im gradyentleri meydana gelebilir, fakat arayüzeyden geçi te atomların aktarılmasına kar ı sadece ihmal edilebilir bir direnç mevcuttur. Yapısal a ırı so uma teorisi, ba langıçta düzlemsel cephede, arayüzeyin önünde katı ve sıvının hangisinin termodinamik olarak kararlı oldu u sorusu ile ilgilenir. Kararlı olan sıvı ise arayüzeyin düzlemsel kaldı ı, kararlı olan katı ise arayüzeyin bozuldu u kabul edilir. ekil 2.3'te düzlemsel cephede katıla ma yapısının ematik gösterimi verilmi tir.



ekil 2.3. Düzlemsel cephede katıla manın ematik gösterimi.

2.1.2. Ala ımların Hücresel Katıla tırılması

Arayüzey yapısının bozularak hücresel biçime, daha sonra da dendritik biçime nasıl dönü tü ü ekil 2.4'te gösterilmi tir. Düzlemsel cephede katıla an bir ala ım sisteminde ilk katıla an kısmın bile imi, ortalama C_o bile iminin altında olu ur. Dolayısıyla bir kısım çözünen madde sıvı içine itilir. Katıla ma ilerledikçe sıvı içine itilmi çözünen madde miktarı arayüzeyde artar ve çözünence zenginle en arayüzeyde sıcaklık azalır [60, 63].

E er arayüzeyin önündeki sıcaklık gradyenti kritik sıcaklık gradyentinden daha büyük ise arayüzey sıcaklı ı normal sıcaklı ın üstünde olacak ve katıla an kısım tekrar erimeye ba layacaktır. E er düzlemsel arayüzeyin önündeki sıcaklık gradyenti yava ça kritik sıcaklı ın altına dü ürülürse düzlemsel arayüzeydeki ilk çıkıntılar ekil 2.4.b'deki gibi olu ur. Çıkıntılardan sıvı içerisine itilen çözünen madde, çıkıntının ön ve yanlarında toplanarak bu bölgeleri çözünence zenginle tirir ve arayüzey sıcaklı ını sıvı denge sıcaklı ının altına dü ürür. Bu nedenle, katı-sıvı arayüzeyi kararsız hale gelir ve arayüzey sıcaklı ının en dü ük oldu u yerlerde yeni çıkıntılar olu ur.



ekil 2.4. Düzlemsel katıla madan dendritik katıla maya geçi [64].

Bu çıkıntılar tarafından itilen çözünen maddeler çıkıntılar arasında toplanırlar ve çözünen maddelerce zenginle en bu bölgeler sıvı halde iken ekil 2.4.d'de görüldü ü gibi, çıkıntılar sıvının içine do ru hücreler halinde ilerler ki böyle bir katıla tırma olayına *hücresel katıla tırma* denir. Hücrenin uçlarındaki sıcaklık, hücrenin gerisindeki sıcaklıktan daha yüksek oldu undan, hücrenin gerisi ön kısmına göre çözünen madde yönünden daha zengindir. Katıla tırma hızı yeterince yüksek de ere ula ınca ekil 2.4.e'de görülen çam a acına benzer bir yapı olu ur ki bu yapı dendritik yapı olarak bilinir.

Metalik ala ımlarda hücresel ve dendritik yapıları incelemek için en iyi yol, katıla tırmayı aniden so utma (quench) ile durdurmaktır. Bu metot, a ırlıkça %1'den daha fazla çözünen içeren ala ımlarda oldukça iyi sonuçlar vermektedir [65]. ekil 2.5'te hücresel katıla ma yapısı ve mikroyapı parametrelerinin ematik gösterimi verilmi tir.



ekil 2.5. Hücresel katıla ma yapısının ematik gösterimi.

2.1.3. Ala ımların Ötektik Katıla tırılması

" $\ddot{O}tektik$ " kelimesi, Yunancada kolay eriyen anlamına gelmektedir. Ötektik bölge, bir ala ım sisteminde r ve S gibi katı fazlar ile sıvı fazın dengede oldu u üçlü bölgedir. Bu noktalardaki sıcaklı a $\ddot{O}tektik sıcaklık$, bile ime de $\ddot{O}tektik bile$ im denir. Ötektik ala ımı olu turan iki bile enli sistemlerde, bile enler birbirinin erime sıcaklıklarını dü ürür ve ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda iki farklı katı faza dönü ür. Dolayısıyla ötektik reaksiyon,

Sivi faz
$$\xrightarrow{so \ uma}_{isinma}$$
 Kati faz (r) + Kati faz (s)

eklinde ifade edilir [66]. Bu tür reaksiyona sahip sistemlere de *ötektik sistemler* denir. Bu reaksiyon esnasında iki katı faz yan yana gelerek ince tabakalar halinde ekillenir ve ötektik yapı olu ur [66]. Ötektik yapının olu umu; katıla ma hızı, sıcaklık gradyenti ve ala ımın bile imine göre de i im gösterir. ekil 2.6'da iki bile enli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve katıla ma yapısı verilmektedir.

ekil 2.6'da verilen faz diyagramındaki sembollerden \ddot{O} ; ötektik bile im, $T_{\ddot{O}}$; ötektik sıcaklık, T_A ve T_B ; A ve B bile enlerin saf haldeki erime sıcaklıkları, C_1 ; oda sıcaklı ında B metalinin r fazındaki çözünme sınırı, C_2 ; B metalinin r fazındaki en yüksek erime sınırı, C_3 ; A metalinin r fazındaki en yüksek erime sınırı anlamına gelmektedir.



Faz diyagramında gösterilen $C_{\ddot{O}}$ ötektik bile imindeki ala ım sistemi, sıvı halden so uyarak, $T_{\ddot{O}}$ ötektik sıcaklı a geldi inde, ötektik reaksiyon sonucu r ve S fazları olu ur. Bu dönü üm sırasında r ve S kristalleri yan yana, sık ve ince tabakalar halinde büyür ve katıla tırma artlarına ba lı olarak ötektik yapı olu ur. Benzer ekilde ekil 2.7'de üç bile enli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı olu umu verilmi tir. Üç bile enli sistemlerde ise, ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda üç farklı katı faza (veya iki-üç intermetalik faza) dönü ür.



ekil 2.7. Üç bile enli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikrovapı olu umu.

ekil 2.8'de arayüzey çözünen konsantrasyonuna ve a ırı so umaya ba lı olarak r ve S lamellerinin olu umu görülmektedir. ekil 2.8.a'da *A* bile enince zengin olan r fazı katıla ırken, *B* atomları sıvı içerisine hareket ederek *B* bile enince zengin olan S fazını olu turmasının ematik gösterimi verilmi tir. Benzer ekilde S fazının önüne *A* atomları itilerek r fazı olu ur. ekil 2.8.b'de ise *B* atomları r lamelleri önünde hafifçe artarken S lamellerinin önünde azalır. Katı-sıvı arayüzeyindeki *A* ve *B* atomlarının kısa mesafe difüzyonu ile r ve S katı fazlarının olu turdu u lamelsel yapılar ise ekil 2.8.c'de verilmektedir. Bu lamelsel ötektiklerin geni li i büyüme hızı ve difüzyon hızına (Γ fazı önündeki *B* atomlarının S fazına geçi hızı ve S fazı önündeki *A* atomlarının Γ fazına geçi hızı) ba lıdır. Buna göre, katıla ma ne kadar hızlı gerçekle tirilirse, ötektik tane yapısı o oranda küçük olur [66].



ekil 2.8. Lamelsel ötektik büyümenin ematik gösterimi [67],
(a) Lamelsel büyümede katı-sıvı arayüzey ekli,
(b) Katı-sıvı arayüzeyinde *A* ve *B* atomlarının bile imi,

(c) Lamelsel ötektik mesafeler.

 Γ - S arayüzeyine ait yüzey geriliminin (X_{rs}) belirlenmesi ile de } bulunabilir. Örne in, bir mol sıvının katıla tırılmasıyla olu an serbest enerji de i imi,

$$UG(\}) = -UG(\angle) + \frac{2x_{rs}V_m}{\}}$$
(2.1)

e itli i ile verilir [27]. Burada UG(), ötektik mesafeye ba lı serbest enerji de i imi, UG(;), }'nın çok büyük de erleri için azalan serbest enerji de i imi ve V_m ötektik malzemenin molar hacmidir. UG()>0 ise katıla ma olmaz. UG(;), arayüzey enerjisini dengelemek için yeterince büyük olmalıdır. Yani ötektik katı-sıvı arayüzeyi, ötektik denge sıcaklı 1 altında a ırı so utulmalıdır. E er toplam alt so uma UT_o ile tanımlanırsa, UG(;) yakla ık olarak,

$$UG(z) = \frac{UHUT_o}{T_E}$$
(2.2)

eklinde ifade edilir. Burada U*H*, entalpi de i imidir. Lamelsel mesafenin alabilece i en küçük de er ($\}^*$) için, U*G*($\}^*$) = 0 oldu u göz önüne alınırsa,

$$UG(z) = \frac{2x_{rs}V_m}{z}$$
(2.3)

$$\}^{*} = \frac{2x_{rs}V_{m}}{UG(\infty)} = \frac{2x_{rs}V_{m}T_{E}}{UHUT_{o}}$$
(2.4)

e itli i bulunur [27].

2.2. Ötektik Yapıların Sınıflandırılması

Ötektik ala ımların kontrollü katıla tırılması ile olu an mikroyapıların sınıflandırılması konusunda de i ik görü ler ileri sürülmü tür [68-74]. Bu sınıflandırmalar ço unlukla mikroyapıların morfolojik görünümlerine ba lı olarak yapılmı tır.

Schiel [68] ötektik mikroyapıları normal ve anormal olmak üzere iki ana grupta incelemi tir. Bu sınıflandırmada, ötektik yapıdaki fazların da ılımında birbirlerine göre düzenlilik derecesi dikkate alınmı tır. Normal mikroyapılar sürekli bir ana faz

(matrix) içerisine gömülmü birbirine paralel lamelsel, çubuksal ve küresel kristallerden meydana gelmi tir. Anormal mikroyapılarda ise ötektik mikroyapıyı olu turan fazların aynı hızda ve sıcaklıkta büyümedi i ve fazların geli igüzel yöneldi i yapılardan meydana gelmi tir.

Chadwick [69] ise ötektik yapıyı sürekli, süreksiz ve spiral olmak üzere üçe ayırmı tır. Sürekli yapılar, lamelsel ve çubuksal yapılardan meydana gelirken, süreksiz yapı bir ana faz içerisinde geli igüzel da ılmı taneciklerden meydana gelmi tir. Spiral katıla ma eklini gösteren ötektik yapılar ise aynı isimle anılmı tır. Bu sınıflandırma, optik mikroskopta incelenen numunelerin yüzeylerindeki yapıların ekilsel görünü lerine göre yapılmı tır.

Hunt ve Jackson [67] tarafından geli tirilen ve ötektik mikroyapıyı olu turan fazların erime entropilerine dayanan sınıflandırma, ikili ötektik ala ımların katıla masıyla ortaya çıkan mikroyapıları üç gruba ayırmı tır. Bu yapılan sınıflandırmaya ait mikroyapı olu umları ekil 2.9'da ematik olarak gösterilmektedir. Bunlar,

a) Düzlemsiz-Düzlemsiz (Nonefaceted-Nonefaceted) Ötektikler; Her iki elementin erime entropisi dü üktür ve sadece düzenli lamelsel (regular lamellar) veya fiber eklinde mikroyapılar olu ur. Metal-metal ötektik ala ımlarda gözlenir (Sn-Pb, Al-Zn).

b) Düzlemsiz-Düzlemli (Nonefaceted-Faceted) Ötektikler; Elementlerden birisi dü ük di eri ise yüksek erime entropisine sahiptir. Bu tür ala ımlarda düzensiz veya kompleks düzenli mikroyapılar görülür. Metal-ametal ötektik ala ımlarda gözlenir (Al-Si, Fe-C).

c) Düzlemli-Düzlemli (Faceted-Faceted) Ötektikler; Bu tür ötektiklerde hiçbir düzenli yapı olu maz. Bu tür mikroyapı, sadece organik ötektiklerde (Azobenzen-Benzil), bazı yarı metallerde (Bi, Si, Ge) veya erime entropisi yüksek intermetalik bile iklerde görülür.

Croker ve ark. [70,71], Hunt ve Jackson'un [67] ortaya attıkları modeli geli tirerek ötektik yapıları daha anlamlı bir ekilde sınıflandırmı lardır. Buna göre ötektik fazların düzlemli olup olmaması, ötektik sıcaklıktaki dönü üm entropisine ba lıdır. Katı-sıvı dönü üm entropisi US_{Γ} Í 23 J.mol⁻¹K⁻¹ oldu u durumda, faz düzlemlidir ve normal ötektikle anormal ötektik birbirinden ayrılır. Normal ve özellikle anormal ötektiklerde yapılar, düzlemli fazın hacim oranı V_F , katıla ma hızı, sıcaklık gradyenti ve bile ime ba lı olarak de i ir. Croker ve ark. [69,70] ötektikleri a a ıda ayrıntıları verilen normal ve anormal olmak üzere iki ana grupta incelemi lerdir.



ekil 2.9. Do rusal katıla tırılmı ötektik ala ımlara ait farklı yapılar

(a) Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), düzlemsel arayüzey,

- (b) Düzlemsiz/Düzlemsiz (Nf/Nf), e risel arayüzey,
- (c) Düzlemsiz/Düzlemli (Nf/F), düzlemsel arayüzey,
- (d) Düzlemsiz/Düzlemli (Nf/F), e risel arayüzey,
- (e) Düzlemli/Düzlemli (F/F), düzlemsel arayüzey,
- (f) Düzlemli/Düzlemli (F/F), e risel arayüzey.

2.2.1. Normal Ötektikler

Normal ötektiklerde, her faz dü ük bir dönü üm entropisine sahip olup, çekirdeklenmeden sonra pürüzlü bir katı-sıvı arayüzeyi boyunca büyüme görülür. Çok az bir alt so uma ile r ve S lamelleri veya ana faza çökelmi çubuksal yapılar olu ur. Bu yapılar normal ötektiklerin en genel özelli idir. Denge artlarında, sıvıda bir bile im gradyenti vardır. Bu bile im gradyenti katı-sıvı arayüzeyinden yayılan *A* ve *B* atomlarınca olu turulur. Bu yüzden lamelsel veya çubuksal kristaller arası mesafe (}) korunur [72]. Normal ötektik mikroyapılar kendi içerisinde ikiye ayrılır [70,71]. Bunlar;

a) Lamelsel; Uzun mesafeler boyunca uzanan düzenli fakat kristal hatalarıyla kesilen birbirine paralel lameller eklindeki kristallerden olu an mikroyapıdır.

b) Çubuksal; Uzun mesafeler boyunca uzanan ve katıla ma yönü do rultusunda birbirine paralel olarak yönelmi düzenli fiber eklindeki kristallerden olu an levhasal mikroyapıdır. Yapı düzenlidir fakat ana faz içerisinde dik kesiti çok kö eli ve çubuksaldır.

2.2.2. Anormal Ötektikler

Anormal ötektik yapı, ticari bakımdan çok önemli olan Al-Si ve C-Fe-C ala ımlarında görülür. Fazlardan biri düzlemli karaktere sahip oldu undan, normal ötekti e göre çok farklı ve karma ık mikroyapısal özellik gösterir. Düzlemli fazlarda kinetik alt so uma UT_k büyük oldu undan ötektik büyüme yava olur. Dolayısıyla sıcaklık dalgalanmaları dengelenemez. Kinetik engelin a ılmasındaki zorluklardan dolayı düzensiz ve farklı yapılar olu ur. Düzlemli fazın büyümesi için katı-sıvı arayüzeyinde büyüme tabakalarının olu ması gerekir. Bu tabakalar ve iki boyutlu çekirdeklenme, yüzeyde olu an düzensizliklerden kaynaklanır. Bu düzensizliklerin olu umu ise büyük ölçüde alt so umaya ba lıdır. Düzlemli fazın farklı kristal büyüme özelli i, anizotropik karakteri, di er faz ile e -zamanlı büyümemesi, anormal ötektiklerin çok farklı yapılara sahip olmasına neden olur [72].

E er düzlemli-düzlemsiz ötektik bir sistemde, düzlemli fazın hacim oranı V_F , düzlemsiz fazın hacim oranı V_{NF} 'den küçük ise kesikli lamelsel (broken lamellar) yapılar olu ur. Bu olu umun nedeni, düzlemli olmayan fazın, düzlemli olan fazın büyümesini nispeten veya tamamen engellemesinden kaynaklanır. Düzlemli fazın hacim oranı, biraz daha artırılırsa düzlemli olmayan faz, düzlemli fazı büyüme esnasında sık sık ku atır ve sıvı ile temasını kısmen keser. Bu engellemeyi a mak için düzlemli faz, dallanmalar ve farklı yönelimler gösterir.

E er V_F artırılırsa, düzlemli faz atomları katı-sıvı arayüzeyinde birikim gösterir. Bu arayüzey birikimi, yapısal alt so umaya sebep olur ve karma ık düzenli yapı meydana gelir. V_F , matris yani ana faz olu turacak kadar çoksa, mikroyapı düzlemli olmayan fazın yarı düzenli da ılımından olu ur. Katıla tırma hızı ve sıvı sıcaklık gradyenti bu olu umda önemli rol oynar. Yüksek G/V artlarında katıla tırma, düzlemli fazın çevrelenmesini önler ve izotermal katı-sıvı arayüzeyi olu ur. E er arayüzey büyüme hızı (V) artarsa (dü ük G/V artında) izotermal arayüzey bozulur, bu ise düzlemsel fazın di er faz tarafından çevrelenmesine ve düzensiz yapı olu umuna yol açar [72]. Anormal ötektik mikroyapılar kendi içerisinde altıya ayrılır [70, 71]. Bunlar;

a) Fleyk (Flake) Yapı; Uzun mesafeler boyunca düzenli olmayan, dallanmı veya dallanmamı levhasallardan olu an kuru yaprak veya 'mısır gevre i' eklindeki kristallerden olu an mikroyapılardır.

b) Kesikli Lamelsel (Broken Lamellar) Yapı; Kesikli levhaların olu turdu u düzenli sayılabilecek mikroyapılardır.

c) Lifli (Fibrous) Yapı; Uzun mesafeler boyunca düzensiz olarak uzanan ve birbiri ile ba lantılı çok ince fiberlerden olu an mikroyapılardır.

d) Karma ık Düzenli (Complex Regular) Yapı; Çok küçük bir hacim içerisinde ve genellikle spiral biçimli birbirine paralel düzenli levhalardan olu an mikroyapılardır.

e) Çin Yazısı (Chinese Script) Yapı; Birbirinden ayrı, küçük ve ince bir ekilde dallanmı mikrodüzlemli levhalardan olu an mikroyapılardır.

f) Yarı Düzenli (Quasi Regular) Yapı; Erime entropisi yüksek bir ana faz içindeki düzlemsiz fazın levha veya fiber eklindeki kristallerinden olu mu mikroyapılardır.
Bu yapı, üçüncü bile en ilavesi ile veya özel katıla tırma artlarında elde edilebilir.

Her ne kadar yorum ve tanımlarda bazı farklılıklar olsa da ara tırmacılar tarafından ortak olarak benimsenen ötektik yapılar ekil 2.10'da ematik olarak gösterildi i gibidir [59].



ekil 2.10. Farklı ötektik yapıların ematik gösterimi, (a) Lamelsel ötektik (Pb-Sn), (b) Çubuksal ötektik (Cu-Cr), (c) Küresel ötektik (Cu-CrO), (d) Karma k Düzenli ötektik (Al-Si).

2.3. Ötektik Katıla tırma ve Katkılama Maddeleri Üzerine Yapılan Deneysel

Çalı malar

Alüminyum ve alüminyum ala ımları, artırılabilen mukavemet özelikleri ve korozyon dirençleri, özgül a ırlı ının dü ük olması, elektri i ve ısıyı iyi iletmesi ve kolay biçimlendirilebilirlik gibi özeliklerinden dolayı günümüz endüstrisinde son yıllarda artan kullanım alanına sahip malzemelerden biri haline gelmi tir.

Mühendislik uygulamalarında ve insan ya amında yaygın kullanım alanı bulan alüminyumun en belirgin özelli i hafifli idir. Di er metallerle kar ıla tırıldı ında alüminyum, elektrik iletkenli i, ısı iletkenli i, gibi pek çok üstün özellikleri bakımından aranılan bir metaldir. Buna ilaveten alüminyuma katkılanan ala ımlama elementleri de alüminyumun mukavemet ve sertlik özelliklerini daha da iyile tirerek di er metallere göre üstün olmasını sa larlar. Yapılan çalı malara bakıldı ında özellikle ötektik komposizyonda çalı maların yo unla tı 1 görülmektedir. Çünkü ötektik ala ımlar komposizyonu olu turulan elementlerin erime noktasından daha dü ük erime noktasına sahiptir ve tek bir sıvı fazdan iki veya daha fazla ayrı katı fazlar elde edilmesi nedeniyle endüstriyel uygulama alanına sahiptir [75-77].

Bir malzemenin mekanik ve termofiziksel özellikleri yalnızca ilave edilen ala ımlama elementleri ile de il aynı zamanda uygulanan üretim tekni ine de ba lıdır. Mühendislik alanında gerilime dayanıklı malzeme üretiminde kontrollü katıla tırma tekni i oldukça fazla kullanılmaktadır. Ayrıca alüminyum ve alüminyum ala ımlarında hacim küçülmesi nedeniyle çöküntüler, çatlama ve çarpılmalar gibi döküm hataları di er ala ımlara nazaran oldukça fazla olup Bridgman tekni i kullanılmasıyla ala ımlarda olu abilecek hatalar en aza indirgenebilir.

Alüminyum ala ımları, alüminyuma bakır, silisyum, demir, çinko, magnezyum, manganez, nikel, titanyum, vb. elementler katılarak olu turulur. Bunların bazen biri, bazen daha ço u alüminyuma katkılanırlar. Alüminyuma katılan ala ımlama elementlerinin etkileri dökülebilirlik, mekanik mukavemet, kimyasal stabilite, i lenebilme, ısıl genle me, ısıl iletkenlik, ısıya mukavemet olarak sıralanabilir [86, 87, 95-97, 103-106].

Günümüzde Al-Si ala ımları, dayanım/a ırlık oranının yüksek olu u, yüksek ısıl ve elektriksel özellikleri ve kum kalıba dökümden basınçlı döküme kadar birçok yöntemle dökülebilmelerine imkan sa layan mükemmel döküm kabiliyetleri nedeniyle otomotiv endüstrisinden havacılık sanayine kadar geni bir alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Al-Si ala ımlarının, yumu ak ve sünek alüminyum fazı ile sert ve kırılgan silisyum fazından meydana gelen bir karma malzeme oldu u söylenebilir. Alüminyumun hafifli i, plastik ekil de i tirme kabiliyetinin yüksek olu u, yüksek elektriksel özellikleri, korozyon dayanımının yüksekli i, manyetik olmayı 1 ve kaynak kabiliyetinin iyi olması ana tercih sebeplerindendir. Saf alüminyumun bu avantajlarının yanı sıra döküm kabiliyetinin iyi olmayı ı, sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin dü ük olu u gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Silisyumun ala ım elementi olarak en büyük etkisi döküm kabiliyetini arttırmasıdır. Silisyumun ilavesi ile ala ımın akıcılı ı ve mekanik özellikleri artarken, özgül a ırlık ve ısıl genle me katsayısı azalmaktadır. Mikroyapıda da mekanik özelliklere en büyük etkiyi, yapı içerisindeki ötektik silisyumun boyutu, morfolojisi ve da ılımı yapmaktadır. Mikroyapı içerisindeki silisyumun boyutu, morfolojisi ve da ılımı

ala ımın so uma hızının de i tirilmesi ya da ala ım içerisine silisyumun katıla ma mekanizmasını de i tiren element ya da bile iklerin eklenmesi ile farklıla tırılabilir ve bu farklıla manın sonucu olarak mekanik özelliklerde artı ya da azalma gözlenir [79-84].

Silisyum ihtiva eden alüminyum ala ımları, yüksek akı kanlıkları sebebiyle dizayn bakımından karı ık olan parçaların dökümünde kullanılabilirler [75, 78-83]. Ayrıca bu ala ımların mukavemetleri atmosfer etkilerine, süneklik ve darbeye kar ı daha yüksektir. %10-13 nispetinde silisyum ihtiva eden alüminyum ala ımları içten yanmalı motorlarda, silindir ve karterlerde, vites kutularında ve piston yapımında tercih edilmektedir [79-84].

2.3.1. Mikroyapı Üzerine Yapılan Çalı malar

Ötektik katıla ma olayını açıklayabilmek mikroyapı parametresi (}) ile katıla tırma parametresi (V) arasındaki ili kiyi ortaya koymak amacıyla ötektik ala ımlara yapılan katkılama malzemelerinin mekaniksel, elektriksel ve ısısal özelliklere etkisini bulabilmek için ara tırmacılar tarafından birçok deneysel çalı ma yapılmı tır. Bu çalı malardan bazıları a a ıda verilmi tir.

Kaya [5] yaptı ı çalı mada Al-Si ötektik ala ımları için mikroyapı parametresi olan }'nin farklı katıla tırma hızlarında de i imini incelemi tir. Yüksek saflıktaki (>%99) metallerden ötektik ala ımlar hazırlamak için a ırlıkça oranları ayarladıktan sonra vakumlu eritme fırınında, grafit pota içerisinde eritilmi tir. Daha sonra, eriyik haldeki ala ımı önceden sıcak döküm fırınına yerle tirilen grafit kalıplara (200 mm uzunlu unda 4 mm iç çapında ve 6,35 dı çapında) dökmü ve katıla tırmı tır. Sıcak döküm fırınına numunelerin her birini sırasıyla Bridgman tipi kontrollü katıla tırma fırınına yerle tirdikten sonra numuneleri sabit sıcaklık gradyenti (G=78,0 0 C/cm), farklı katıla tırma hızlarında (8,30–498,70 µm/s) katıla tırmı tır. Bu i lemlerden sonra, numunelerin mikroyapı foto rafları üzerinden do rusal kesi im metodu kullanılarak $\lambda = kV^{-0.46}$ (k = 23,44 µm^{1.46} s^{-0.46}) ba ıntısı bulunmu tur.

Mohamed ve ark. [85], Al-10,8%Si ala ımına Fe, Mn, Cu ve Mn elementlerinin katkılanmasının malzemenin mikroyapısına etkisini incelemi lerdir. Demir ve mangan katkılanan ala ımlarda intermetalik fazın hacminin ve küçük çokgen parçacıkların veya

yıldız benzeri parçacıkların arttı 1 gözlenmi tir. Magnezyum ve Demir oranı yüksek düzeyde iken Al₅Cu₂Mg₈Si₆ ve -Fe fazının olu tu u gözlenmi tir.

Zeren ve ark. [86], Al-Si ötektik ala ımına %(2, 3, 4, 5) oranlarında Cu katkılanmasının malzemenin mikroyapısı ve mikrosertlik özelliklerine etkisini ara tırmı lardır. Al-Si ala ımı eritilip Cu elementi katkılandıktan sonra hazırlanan ala ım 690 0 C'de dökümü yapılmı ve 500 0 C'de 7 saat bekletilmi tir. Cu etkisinin ötektik faza ve erime noktasına etkisi ara tırılmı tır. Al-Si ala ımına katkılanan Cu oranın artması ile sertlik de erlerinde artı gözlenirken, erime sıcaklı ında dü me görülmü tür.

Faraday ve ark. [87], Al-Si ötektik ala ımlarına Bi, Sb ve Sr elementleri katkılayarak farklı so utma hızlarında, ısısal so uma e risi analizi yöntemi kullanılarak, katkı elementlerinin bu ala ımların so uma e rilerine etkisini incelemi lerdir. Katkılama elementlerinin Al-Si ötektik fazını etkiledi i gözlenmi tir. Al-Si ötektik fazına katkılanan Bi ve Sb elementlerinin Al-Si so uma e risinde yükselmeye, Sr katkılanmasının ise dü ü e sebep oldu u gözlenmi tir.

Rios ve ark. [90], Al-Nb ötektik ala ımına Cu, Si, Ni, Ti, Cr katkılanmasının ala ımın mikroyapısına etkisini ara tırmı lardır. Deneylerde, sıcaklık gradyenti 8 K/mm, büyüme hızı 5,55 μ m/s de erinde ve sıcaklı 1 1610 °C'de tutulmu tur. Ara tırmacılar, Al₃Nb-Nb₂Al ötektik ala ımının mikroyapısında hücreler içerisinde lamelsel yapı ile hücresel ötektik morfoloji olu tu unu tespit etmi lerdir. Bu ötektik ala ıma Ni katkısının ötektik hücreler sınırında ince lamelsel yapıların ve içerisinde lifsi yapı meydana getirdi i, Ti katkısı ile dendritik mikroyapının meydana geldi i, Si katkısı ile birincil fazların mevcut oldu u ötektik dı 1 bir yapının meydana geldi i, Cr katkısı ile de mikroyapıda dü ük kesirli ötektik ve daha yüksek hacim kesirli birincil fazın mevcut oldu u daha az düzenli bir yapının olu tu unu tespit etmi lerdir.

Öveço lu ve ark. [91] Al-%8Si-%5,1Cu (a .) ala ımını 10^{6} - 10^{7} K/s so uma hızlarında katıla tırarak mikroyapısını ve sertli ini incelemi lerdir. Al-8Si-5,1Cu eridi ile Al-8Si-5,1Cu dökümüne ait mikroyapı parametreleri kar ıla tırılmı tır. erit ve dökümün XRD analizlerinde, Al-8Si-5,1Cu dökümünde Al, Si ve Al₂Cu fazlarının mevcut oldu u, Al-8Si-5,1Cu eridinde ise Al fazının mevcut oldu u, hiçbir intermetalik fazın

olu madı ı tespit etmi lerdir. Al-8Si-5,1Cu eridi ile Al-8Si-5,1Cu dökümüne ait dendrit kol mesafeleri kar ıla tırılmı ve eride ait dendrit kol mesafesi (0,36 μ m), döküme ait kol mesafesinden (yakla ık 11,42 μ m) yakla ık 32 kat daha küçük de erde elde edildi ini gözlemi lerdir.

Ala ım(%a .)	G	V (~m/s)	Ba ıntı	Kaynak
	(K/mm)			
Al-12,6Si	7,8	8,3-498,7	$\lambda = 23,44 V^{-0,46}$	[89]
Al-12,7Si-0,2Sb	12,9	250		[92]
Al-13Si	7-14	10-2000	$\lambda_{\rm L}$ =55V ^{-0,52} $\lambda_{\rm A}$ =48V ^{-0,55} $\lambda_{\rm M}$ =27V ^{-0,53}	[93]
Al-7Ni	4,2	8,3-489,5	$\lambda_1 = 851.1 V^{-0.26}$ $\lambda_2 = 124.2 V^{-0.48}$	[109]
Al-7Si	3	15-180	$\lambda_2 = 124, 2 \sqrt{2}$ $\lambda_2 = 84, 1 \sqrt{-0.63}$	[94]
Al-7Si-1Fe	3	15-180	$\lambda = 143.4 V^{-0.39}$	[94]
Al-7Si-1Mn	3	15-180	$\lambda_{0} = 84.5 V^{-0.54}$	[94]
Al-6Si-4Cu	3	15-150	$\lambda_a = 246 V^{-0,24}$	[95]
Al-11,1Si-4,2Ni	5,82	6,60-243,33	$\lambda_{\rm Si} = 12,58 {\rm V}^{-0.50}$	[96]
			$\lambda_{Al3Ni} = 7,94 V^{-0,47}$	
Al-12,95Si-4,96Mg	9,39	8,64-165,20	$\lambda_{si}=29,32V^{-0,45}$	[97]
Al-7Si-0,6Mg	3	15-150	$\lambda_{\rm E}=33,5{\rm V}^{-0,50}$	[98]
Al-10,98Si-4,9Ni		1,39-6,95	$\lambda_a = 0,11 R^{-0,46}$	[99]
Al-11,7Si-1Fe	6,63	8,25-164,81	$\begin{array}{c} \lambda_{Si} {=} 12,\! 13V^{{-}0,38} \\ \lambda_{(Al5SiFe)} {=} 30,\! 71V^{{-}0,39} \end{array}$	[46]
Al-12Si-5Ni-0,4Fe	6,43	8,25-164,81	$\begin{array}{l} \lambda_{(Si)} = 9,94 V^{-0,38} \\ \lambda_{(A13Ni)} = 8,91 V^{-0,34} \end{array}$	[46]
Ti-43Al-3Si (at.%)	20	5-60	$\lambda = 650, 1V^{-0,44}$ $\lambda_{(L)} = 13, 2V^{-0,41}$	[111]
Al-23,9Cu-1,2Co	5,66	8,3-166	$\lambda = 12,02V^{-0,44}$	[127]
Al-13,6Cu-6Si	4,64	8,3-166	λ=662,22V ^{-0,21}	[127]
Al-1,1Sb	4,05	8,3-152	$\lambda = 1,17V^{-0,47}$	[141]

Tablo 2.1. Alüminyum esaslı ala ımlarda katıla tırma üzerine yapılan bazı çalı malar ve elde edilen ba ıntılar.

Hosch ve ark. [93], Al-13Si ötektik ala 1m1ni iç çapı 5 mm dı çapı 8 mm olan alümina tüp içerisinde 7-14 K/mm sıcaklık gradyentinde, 10-2000 µm/s büyüme hızlarında 50 mm do rusal katıla tırıldıktan sonra Ga-In-Sn sıvı ala 1m1 banyosunda ani so utma
(quench) yapıp, fleyk-fiber yapıya geçi i incelemi lerdir. Fleyk-fiber yapıya geçi in 100-950 μ m/s büyüme hızlarında meydana geldi ini tespit etmi lerdir. 10 ve 20 μ m/s hız de erlerinde mikroyapı iri silisyum levhalardan (plate) olu urken, 100-250 μ m/s hız de erlerinde belirgin mikroyapısal bir de i im görülmeye ba lanmı tır. 250 μ m/s hız de erinde levhasal yapı bozulmaya ba lamı ve levha düzlemleri içerisinde çubuk biçimli yapılar olu maya ba lamı tır.

Steinbach ve ark., Al-6Si-4Cu [95] ve Al-7Si-0,6Mg [98], ala ımlarını sabit bir sıcaklık gradyentinde (3 K/mm), farklı katıla tırma hızlarında (15-150 µm/s) do rusal katıla tırmı lardır. Al-6Si-4Cu ala ımında birincil kol mesafeleri ile katıla tırma hızları arasında $\}_E = 246V^{-0.24}$ ba ıntısını elde etmi lerdir. Al-7Si-0,6Mg ala ımında sıvı akı ının mikroyapıya etkisini ara tırmı lardır ve ötektik mesafe ile katıla tırma hızı arasında $\}_E = 33,5V^{-0.5}$ ba ıntısını elde etmi lerdir.

Literatürde yer alan bazı ikili ve üçlü ötektik ala ımlar ve bu ala ımlara yapılan katkı malzemeleri üzerine yapılan katıla tırma çalı maları, katıla tırma parametreleri ile mikroyapı parametresi arasındaki ili ki ve ba ıntılar Tablo 2.1'de verilmi tir.

2.3.2. Mikrosertlik Üzerine Yapılan Deneysel Çalı malar

Literatürde, ötektik ala ımlar ve bu ala ımlara yapılan katkılama elementlerinin katıla tırma parametreleri ile mikrosertlik de erine etkisini inceleyen birçok bilimsel çalı ma yer almaktadır. Bu çalı malardan bazıları ve elde edilen deneysel sonuçlar a a ıda özet olarak verilmektedir.

Beomjun ve ark. [88], Bi-2,6Ag-0,1Cu ala 1m1na %0,5-%1-%1,5 ve %2 oranlarında Sb katkılamı, mikroyapı de i iklikleri ve mekaniksel özelliklerini incelenmi lerdir. Sb oranın artmasının sertlik de erini 13,5 HV'den 18,1 HV'ye arttırdı 1 gözlenmi tir.

Öveço lu ve ark. [91], hızlı katıla tırma yöntemi ile elde edilen Al-8Si-5,1Cu eridi ile Al-8Si-5,1Cu dökümüne ait sertlik de erlerini kar ıla tırmı lardır. Ara tırmacılar, dökümün sertli ini 80 kg/mm², Al-8Si-5,1Cu eridin sertli ini ise 201 kg/mm² de erinde elde etmi lerdir. Artan so uma hızına ba lı olarak üretilen malzemenin sertli inin de arttı ını tespit etmi lerdir. Ayrıca Al-%12Si ala ımına katkılanan Cu elementinin ala ımın sertli ini artırdı ını gözlemi lerdir.

Elliot ve ark. [100] yaptıkları çalı mada Al ve Si metallerini (Al-%14-17Si (a .)) argon ortamında eriterek hazırladıkları Al-Si ala ımlarına ait örnekleri Bridgman tipi kontrollü katıla tırma fırınında farklı katıla tırma artlarında gözlenen farklı mikroyapıların (fleyk, lifli ve karı ık düzenli) mikrosertlik ölçümlerini yapmı lardır. Mikrosertlik ile katıla tırma hızı arasında HV=kV^m, mikrosertlik ile yapı parametresi (}) arasında ise HV =k $_{E}^{-n}$ tipinde ba ıntılar elde etmi lerdir.

Khan ve ark. [101] yaptıkları çalı mada Al ve Si metallerini Al-12Si ve Al-14,6Si bile imlerinde hazırladıkları numuneleri 0,10-1080 μ m/s katıla tırma hızlarında Bridgman fırınında do rusal olarak katıla tırarak ürettikleri numunelerin boyuna ve enine kesitlerinden optik mikroskop yardımıyla mikroyapı parametresini ölçmü lerdir. Aynı numunelerin sertliklerini enine kesitler üzerinden, Vickers sertlik ölçme yöntemi ile ölçmü lerdir. Elde ettikler deneysel sonuçları kullanarak, HV = kV^m, tipinde ba ıntı elde etmi lerdir. Mikrosertlik de eri ile mikroyapı parametresi arasındaki ili kiyi ise, HV = k $_{\rm E}^{-n}$ ba ıntısı ile ifade etmi lerdir. Bu çalı mada kö eli silisyum, fleyk silisyum ve lifli silisyum yapı için farklı üstel de erler bulmu lardır.

Kaya ve ark. [102], Al-12,6Si ötektik ala ımı Bridgman tipi fırında farklı büyütme hızlarında (8,3-498,7x10⁻³ mm/s) ve sabit sıcaklık gradyentinde (G=7,8 K/mm) do rusal katıla tırma yapılarak malzemenin mikroyapısı ve mekaniksel özellikleri ara tırmı lardır. Katıla ma hızı arttıkça numunenin sertlik de erlerinin de arttı 1 (59,1-81,4 kg/mm²) gözlenmi tir.

Karaköse ve ark., Al-10Ni-5,6Cu [103] ve Al-8Ni-5Nd-4Si [104] ala 1m sistemleri için so utma hızının mikrosertlik de erine etkisini incelemi lerdir. Al-10Ni-5,6Cu ala 1mi için döküm fazında mikrosertlik de eri 69,4 kg/mm² iken, artan katıla tırma hızına ba lı olarak mikrosertlik de erlerinin de 148,6 kg/mm²'den 211,5 kg/mm²'ye arttı 1mi gözlemi lerdir. Al-8Ni-5Nd-4Si ala 1mında ise döküm fazında mikrosertlik de eri 81,1 kg/mm² olarak ölçülürken, artan katıla tırma hızıyla mikrosertlik de erinin 121,1 kg/mm²'den 271,6 kg/mm² de erine arttı 1mi ölçmü lerdir.

Kılıçaslan ve ark. [105], Al-25Si-5Fe-xCo (x=0, 1, 3, 5) ala ımına farklı oranlarda Co katkılayarak mikrosertlik de erlerindeki de i imini ara tırmı lardır. Katkılanan Co

miktarının artması ile mikrosertlik de erinin de 211 HV de erinden 370 HV de erine kadar arttı 1 gözlenmi tir.

Ala ım(%a .)	Mikrosertlik	Referans
Al-12,7Si-0,2Sb	$HV = K^{-0,2}$	[92]
Al-1,1Sb	$HV = 19(V)^{0.08}$	[141]
Al-11,1Si-4,2Ni	$HV = 72.44(V)^{0.08}$	[125]
Al-23,9Cu-1,2Co	$HV = 184,07(V)^{0.05}$ HV = 237,74()^{-0.10}	[127]
Al-13,6Cu-6Si	$HV = 83,18(V)^{0.05}$ HV = 53,34()^{-0.23}	[127]
Al-5Ni	$HV = 52,3()^{-0,5}$	[108]
Al-7Ni	HV = $309 ()^{-0.35}$ HV = $66,1(V)^{0.11}$	[109]
Al-7,5Ni	$HV = 0.18 ()^{-0.24}$	[110]
Al-12,7Si	$\mathbf{HV} = \mathbf{KV}^{0,12}$	[101]
Al-14,6Si		
Al-12,6Si	$HV = 84,92(V)^{0.09}$ HV = 25,35()^{-0.16}	[102]
Ti-43Al-3Si (at.%)	HV =1288,1() ^{-0,19} HV =363,1(V) ^{$0,10$}	[111]
Ti-46 Al-0,5 W-0,5 Si (% at.)	$HV = 398,1()^{-0.31}$ HV = 794,7(V) ^{0,15}	[112]
Al-12,95Si-4,96Mg	HV =1,95($_{Mg2Si}$) ^{-0,5} HV =119,9(V) ^{0.07}	[97]
Al-11,7Si-1Fe	HV =88,11($_{A15SiFe}$) ^{-0,08} HV =0,99($_{A15SiFe}$) ^{-0,5} HV =67,90(V) ^{0,07}	[46]
Al-12Si-5Ni-0,4Fe	HV =104,44($_{AI3Ni}$) ^{-0.20} HV =101,69($_{Si}$) ^{-0.17}	[46]

Tablo 2.2. Mikrosertlik üzerine yapılan çalı malar ve elde edilen ba ıntılar.

Yavuz [106], Al–12Si ala imina farkli oranlarda Fe, Ni ve Co ilave edilerek olu turulan Al–Si–xX [(X=Fe, Ni, Co), (x=0,5-1-1,5-2-2,5 (a))] ala im sistemleri, Bridgman tipi kontrollü katıla tırma firini yardımıyla, sabit sıcaklık gradyenti (6,5 K/mm) ve sabit katıla tırma hızlarında (16,60 μ m/s), farklı komposizyonlarda do rusal olarak katıla tırmı ve de i en katkılama oranlarının mikrosertlik de erlerine etkisi

incelenmi tir. Al-Si ala ımına sırasıyla katkılanan Fe, Ni ve Co oranı ile birlikte mikrosertlik de erlerinin (59,93 kg/mm²-73 kg/mm², 57,36 kg/mm²-71,12 kg/mm² ve 71,60 kg/mm²-81,20 kg/mm²) arttı 1 gözlemlenmi tir.

Karaköse ve ark. [107], Al-8Si-1Sb ala ımı vakumlu ortamda hazırlandıktan sonra farklı katıla tırma hızlarında katıla tırılarak sertlik de erlerini incelenmi lerdir. Hazırlanan ala ımın döküm fazında sertlik de eri 81,1 kg/mm², katıla tırma hızına ba lı olarak 192,5 kg/mm²'den 241,7 kg/mm²'ye arttı 1 gözlenmi tir.

Literatürde yer alan bazı ikili ve üçlü ala ımlar ve bu ala ımlara yapılan katkı malzemeleri üzerine yapılan katıla tırma çalı malarının mikrosertlik de erleri ile katıla tırma parametresi ve mikroyapı parametresi arasındaki ili ki ve ba ıntılar Tablo 2.2'de verilmi tir.

2.3.3. Çekme-Dayanımı Üzerine Yapılan Deneysel Çalı malar

Birçok ara tırmacı ötektik ala ımlar ve bu ala ımlara yapılan katkılama malzemelerinin katıla tırma parametreleri ile çekme-dayanımı arasındaki ili kiyi ortaya koymak amacıyla deneyler yapılmı lardır. Bu ara tırmalardan bazıları ve elde edilen deneysel sonuçları a a ıda özet olarak verilmi tir.

Zeren [113], Al-Cu-Si-Mg ala ımına katkılanan bakır ve silisyumun mekanik özelliklerine etkilerini ara tırmı tır. Bunun için farklı miktarlarda Cu (a .% 1-3-4,5-6) ve Si (a . %0,5-7-12-18), indüksiyon fırınında eritilerek Al-Cu-Si-Mg ala ımına katkılanmı ve 780°C'de 50 mm çaplı metal kalıplara dökülmü ve katıla tırılmı tır. kincil kol mesafelerinin kalıp yüzeyinden olan uzaklıklarla de i imini ve bu uzaklıklardaki so uma hızlarını incelemi ve yüzeyden olan uzaklı ın artması ile ikincil kol mesafelerinin arttı ını, so uma hızının da azaldı ını tespit etmi tir. Si oranın artması ile sertlik ölçüm de erlerinin 45 HB de erinden 102 HB de erine arttı 1, % uzama miktarının ise %12,7 de erinden %1,1 de erine azaldı 1 gözlenmi tir.

Hangxu ve ark., [114] Al-7Si-0,7Mg ala 1m1na Sm, Emamy ve ark. [115] Al-15Mg₂Si ala 1m1na Ni, Shin ve ark. [116] Al-10,5Si-2Cu ala 1m1na Sr, Li ve ark. Al-20Si ala 1m1na Ce [117] ve Er [118] elementlerini artan oranlarda katkılamı lardır. Katkılanan elementin katkı oranı arttıkça malzemenin çekme-dayanımı de erinin ve

%uzama miktarının arttı ını gözlemi lerdir. Zhi ve ark. [119], Al-10,8Si-3Cu ala ımına %1 oranında Sm katkılandı ında çekme-dayanımı de eri 129 MPa olarak, %uzama miktarı ise %3,1 olarak ölçmü lerdir. Sha ve ark. [120], Al-20Si-2Cu-1Ni-0,6Mg ala ımına %0,7 Co katkılayıp elde edilen numunelerin çekme dayanımı de erlerinin 250 MPa de erinden 290 MPa'ya yükseldi ini, katkılanan Co oranı %1,5 oldu unda ise çekme-dayanımı 242 MPa'ya dü tü ünü gözlemi lerdir.

Yavuz [106], Al–12Si (a .) ala imina farkli oranlarda Fe, Ni ve Co ilave edilerek olu turulan Al–Si–xX [(X=Fe, Ni, Co), (x=0,5-1-1,5-2-2,5 (a))] ala im sistemlerinde katkılanan Fe oranın artması ile birlikte çekme-dayanımı de erinin 68,38 MPa de erinden 98,93 MPa de erine arttı 1, katkılanan Ni miktarının artması ile birlikte çekme-dayanımı de erinin 59,68 MPa de erinden 70,33 MPa de erine arttı 1, katkılanan Co oranın artması ile birlikte çekme-dayanımı de erinin 105,54 MPa de erinde 133,69 MPa de erine arttı 1 gözlenmi tir.

Ala ım(%a .)	Çekme-Dayanımı	Referans	
Al-1Ni	=200,2(^{-0,5})	[121]	
Al-3Ni	=325,6(-0,5)	[121]	
Al-5Ni	=468,5(-0,5)	[121]	
Al-5Si	=45() ^{-0,5}	[122]	
Al-9Si Al-1,1Sb Al-11,7Si-1Fe	$=146()^{-0.5}$ =0,276(V) ^{0,15} =301,07(si) ^{-0,37} =269,76(V) ^{0,25}	[122] [141]	
Al-12Si-5Ni-0,4Fe	$=8,50(_{Si})^{-0.5}$ $=177,86(V)^{0.11}$ $=336,67(_{Si})^{-0.28}$ $=349,39(_{2A 3Ni})^{-0.31}$ $=254,73(V)^{0.25}$ $=7,37(_{Si})^{-0.5}$ $=8,42(_{2})^{-0.5}$	[46]	
Al-11,1Si-4,2Ni	=37,15 (V) ^{0,19}	[125]	
Al-23,9Cu-1,2Co	=6,75 (V) ^{0,22}	[127]	
Al-12,95Si-4,96Mg	$=222,84(V)^{0,20}$	[97]	

Tablo 2.3. Çekme-dayanımı üzerine yapılan çalı malar ve elde edilen ba ıntılar.

Konu ile ilgili di er çalı malar Ek-1'de verilmi tir.

Tablo 2.3'de Al esaslı ala ımlar üzerine de i ik ara tırmacılar tarafından yapılan çekme-dayanımı de erleri ile katıla tırma parametresi ve mikroyapı parametresi arasındaki ili ki ve ba ıntılar verilmi tir.

2.3.4. Elektriksel Özdirenç Üzerine Yapılan Deneysel Çalı malar

Çe itli ara tırmacılar, DC dört nokta kontak [123] yöntemiyle ala ımların elektriksel özdirençlerini ölçmü lerdir. Genellikle ara tırmacılar özdirencin katıla tırma hızına ve sıcaklı ına ba lı de i imini incelemi lerdir. Bu konu üzerine yapılan bazı ara tırmalar a a ıda özetlenmi tir.

Beomjun ve ark. [88], Bi-2,6Ag-0,1Cu ala ımına %0,5-1-1,5 ve 2 oranlarında Sb katkılamı, mikroyapı de i imi ve mekaniksel özelliklerinin yanı sıra elektriksel özelliklerini de incelenmi lerdir. Sb oranın artmasının elektriksel özdirencini ($360 \times 10^{-8} \Omega$ m- $480 \times 10^{-8} \Omega$ m) arttırdı 1 gözlenmi tir.

Brandt ve ark. [124], Al-Si ötektik ala ımına katkılanan bazı elementler ile olu turulan ala ımın artan sıcaklıkta (25-550 0 C) elektriksel özdirenç de erleri dört nokta kontak yöntemi ile ölçülmü tür. Al-12Si ötektik ala ımının elektriksel özdirenci 4,25x10⁻⁸ Ω m-12,44x10⁻⁸ Ω m, Al-12Si-0,6Mg ala ımının elektriksel özdirenci 5,20x10⁻⁸ Ω m-14,27x10⁻⁸ Ω m, Al-9Si-2Cu ala ımının elektriksel özdirenci 5,57x10⁻⁸ Ω m-12,77x10⁻⁸ Ω m olarak ölçülmü tür.

Yavuz [106] tarafından, Al–12Si (a .) ala ımına farklı oranlarda Fe, Ni ve Co ilave edilerek olu turulan Al–Si–xX [(X=Fe, Ni, Co), (x=0,5-1-1,5-2-2,5 (a))] ala ım sistemlerinde, de i en katkılama oranlarının elektriksel özdirenç de erlerine etkisi incelenmi tir. Al-Si ala ımına sırasıyla katkılanan Fe, Ni ve Co oranı ile birlikte oda sıcaklı ındaki elektriksel özdirenç de erlerinin (5,35-8,88x10⁻⁸ Ω m, 4,74-7,78x10⁻⁸ Ω m ve 4,61-6,72x10⁻⁸ Ω m) arttı ı gözlenmi tir.

Kaya ve ark., Al-5,7Ni [126], Al-7,5Ni [110] ve Al-1,1Sb [141] ala ımlarını Bridgman tipi fırında farklı büyütme hızlarında ve sabit sıcaklık gradyentinde do rusal katıla tırma yapılarak malzemenin mikroyapısını, mekaniksel ve elektriksel özelliklerini ara tırmı lardır. Al-5,7Ni ala ımının katıla ma hızı arttıkça malzemelerin elektriksel özdirencinin de (9,75-12,88x10⁻⁸ Ω m) arttı 1 gözlenmi ve katıla tırma hızı ile elektriksel özdirenci arasında $=k(V)^n$ (n=0,07) eklinde bir ba ıntı elde edilmi tir. Al-7,5Ni ala ımının mikroyapı parametresi azaldıkça malzemelerin elektriksel özdirencinin (9,63-10,24x10⁻⁸Ωm) arttı ı gözlenmi ve mikroyapı parametresi ile elektriksel özdirenci arasında $=k()^{-n}$ (n=-0,09) eklinde ba ıntı elde edilmi tir. Al-1,1Sb ala ımında ise katıla ma hızı arttıkça malzemelerin elektriksel özdirencinin (0,28-0,45x10⁻⁸Ωm) arttı ı gözlenmi ve katıla tırma hızı ile elektriksel özdirenci arasında $=k(V)^n$ (n=0,12) eklinde bir ba ıntı elde edilmi tir.

Ala ım	Elektriksel Özdirenç(x10 ⁻⁸)	Referans
Al-5,7Ni	$=0,0013 (V)^{0.07}$ $=0,047 (\lambda)^{-0.13}$	[126]
Al-7Ni	$=0,014(V)^{0.07}$ $=0,069(\lambda_1)^{-0.22}$ $=0,062(\lambda_2)^{-0.14}$	[109]
Al-7,5Ni	$=0,091(\lambda_1)^{-0.09}$ $=0,070(\lambda_2)^{-0.12}$	[110]
Al-11,1Si-4,2Ni	$=4,57(V)^{0.08}$	[125]
Al-12,95Si-4,96Mg	$=32,31(V)^{0,13}$	[97]
Al-11,7Si-1Fe	$=5,22(V)^{0.12}$ =11,6(λ_{si}) ^{-0.32} =15,9 ($\lambda_{Al5SiFe}$) ^{-0.32}	
Al-12Si-5Ni-0,4Fe	$=5,06(V)^{0,12}$ $=14,6(\lambda_{Si})^{-0,46}$	[46]
Al-23,9Cu-1,2Co	$=15,7 (\lambda_{Al3Ni})^{-1}$ $=0,086(V)^{0.09}$	[127]
Al-13,6Cu-6Si	$=3,162(V)^{0,14}$	[127]
Al-1,1Sb	$=0,061(V)^{0,12}$	[141]

Tablo 2.4. Elektriksel özdirenç üzerine yapılan çalı malar ve elde edilen ba ıntılar.

Konu ile ilgili di er çalı malar Ek-2'de verilmi tir.

Literatürde yapılan yapılan bazı çalı malar ve elektriksel özdirenç de erleri ile katıla tırma parametresi ve mikroyapı parametresi arasındaki ba ıntılar Tablo 2.4'de verilmi tir.

2.3.5. Isısal Özellikler (Entalpi ve Öz Isı) Üzerine Yapılan Deneysel Çalı malar

Ötektik ala ımlar ve bu ala ımlara yapılan katkılama malzemelerinin öz ısı ve entalpi de erlerinin ölçümü ile ilgili yapılan bazı çalı malar ve sonuçları a a ıda özetlenmi tir.

Kaya ve ark. [126], farklı katıla tırma artlarında Bridgman-tipi kontrollü katıla tırma fırınında do rusal katıla tırdıkları Al-5,7Ni (a .) ala ımının ısısal özelliklerini DSC analiz yöntemi ile ara tırmı lardır. Saf alüminyumun ve nikelin entalpi de erlerini 396,96 J/g ve 297,83 J/g olarak, öz ısı de erini ise 0,897 J/gK ve 0,444 J/gK olarak, Al-5,7Ni ala ımının entalpi de erini 53,43 J/g ve öz ısı de erini ise 0,236 J/gK olarak hesaplamı lardır.

Hangxu ve ark. [114], Al-7Si-0,7Mg ala ımına farklı oranlarda (% 0,3-0,6-0,9) Sm katkılayarak entalpi ve özısı de erlerini ölçmü lerdir. Al-7Si-0,7Mg ala ımının entalpi de eri 253,4 J/g, öz ısı de eri 0,296 J/gK olarak, Al-7Si-0,7Mg-0,3Sm ala ımının entalpi de eri 269,9 J/g, öz ısı de eri 0,317 J/gK olarak, Al-7Si-0,7Mg-0,6Sm ala ımının entalpi de eri 277,2 J/g, öz ısı de eri 0,326 J/gK olarak, ve Al-7Si-0,7Mg-0,7Mg-0,9 Sm ala ımının entalpi de eri 257,7 J/g, öz ısı de eri 0,302 J/gK olarak ölçülmü tür.

Hangxu ve ark. [114], Al-7Si-0,7Mg ala ımına farklı oranlarda (% 0,3-0,6-0,9) Sm katkılayarak entalpi ve özısı de erlerini ölçmü lerdir. Al-7Si-0,7Mg ala ımının entalpi de eri 253,4 J/g, öz ısı de eri 0,296 J/gK olarak, Al-7Si-0,7Mg-0,3Sm ala ımının entalpi de eri 269,9 J/g, öz ısı de eri 0,317 J/gK olarak, Al-7Si-0,7Mg-0,6Sm ala ımının entalpi de eri 277,2 J/g, öz ısı de eri 0,326 J/gK olarak, ve Al-7Si-0,7Mg-0,7Mg-0,9 Sm ala ımının entalpi de eri 257,7 J/g, öz ısı de eri 0,302 J/gK olarak ölçülmü tür.

Karaköse ve ark.[104], Al-8Ni-5Nd-4Si ala ımını melt-spinning yöntemi ile farklı so utma hızlarında katıla tırmı lardır. Ala ımın ısısal özelliklerini DSC analiz yöntemi ile hesaplamı lardır. Entalpi de eri 45,307 J/g ve öz ısı de erini 0,0528 J/gK olarak hesaplanmı tır.

Yılmazer [127], Al-23,9Cu-1,2Co ve Al-13,6Cu-6Si ala ımlarını Bridgman-tipi kontrollü katıla tırma fırınında do rusal katıla tırmı tır ve ala ımların entalpi ve öz ısı de erleri DSC analizi vasıtasıyla hesaplamı tır. Al-23,9Cu-1,2Co ala ımının entalpi de eri

204,8 J/g öz 1s1 de erini 0,324 J/gK, Al-13,6Cu-6Si ala 1m1nn entalpi de eri 331,4 J/g öz 1s1 de erini 0,581 J/gK olarak hesaplanmı tır.

Tablo 2.5'de öz 1sı ve entalpi üzerine yapılan bazı çalı malar verilmi tir.

Ala ım (%a .)	H (J/g)	$C_{p}\left(J/gK ight)$	Referans
Al	396,96	0,897	[126]
Ni	297,83	0,444	[126]
Al-5,7Ni	53,43	0,236	[126]
Al-7Si-0,7Mg	253,4	0,296	[114]
Al-7Si-0,7Mg-0,9Sm	257,7	0,302	[114]
Al-7Si	115,6	0,124	[129]
Al-12Si	468,2	0,563	[130]
Al-18Si	443,44	0,463	[130]
Al-8,1Cu-3Si		1,089	[131]
Al-8Cu-5Si	289,6	1,063	[132]
Al-1Ni		0,902	[128]
Al-1,1Sb	81,73	0,332	[141]
Al-8Ni-5Nd-4Si	45,307	0,0528	[104]
Al-23,9Cu-1,2Co	204,8	0,324	[127]
Al-13,6Cu-6Si	331,4	0,581	[127]
Al-11,1Si-4,2Ni	411,03	0,485	[125]

Tablo 2.5. Öz ısı ve entalpi üzerine yapılan deneysel çalı malar.

Çe itli ara tırmacılar tarafından yapılan deneysel çalı malarda ikili-üçlü ala ımlar ve bu ala ımlara yapılan katkılama elementlerinin malzemenin mikroyapısına, mekaniksel, elektriksel ve ısısal özelliklerine etkisini incelemi lerdir. Katkılanan elementlerin katkı yapılan malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerinde de i ikliklere neden oldu u görülmektedir. Ayrıca katıla tırma hızı ile mikroyapı parametresi, mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel özdirenç de erleri arasında farklı ba ıntılarında elde edildi i ve bu ba ıntılardan mikroyapı parametresinin azalı ve ayrıca büyütme hızının artmasıyla mikrosertlik ve çekme-dayanımı de erinin arttı 1 görülmektedir. Bu sonuçlar katıla tırma parametreleri ile mikroyapı parametresi arasında belirgin bir ili kinin oldu unu göstermektedir. Bu tez çalı masında Al-12,6Si ötekti ine %2 oranında ayrı ayrı katkılanan Cu, Co, Ni, Sb ve Bi elementleri ile elde edilen ala ımların kontrollü katıla tırılması ile katkılanan elementlerin mikroyapı, mekaniksel, elektriksel ve ısısal özelliklerine etkisi incelenmi tir.

Bir sonraki bölümde deneysel sistemler ve deneylerin yapılı 1 ayrıntıları ile anlatılacaktır.

3. BÖLÜM

DENEYSEL S STEMLER VE DENEYLER N YAPILI I

3.1. Giri

Bu tez çalı masında, Al-a .%12,6Si ötektik ala ımına a ırlıkça %2 oranında farklı elementler (*Cu, Co, Ni, Sb ve Bi*) katkılanarak hazırlanmı Al-Si-Cu, Al-Si-Co, Al-Si-Ni, Al-Si-Sb ve Al-Si-Bi master ala ım sistemleri incelenmi tir. Bu inceleme sırasında ala ımlar sabit sıcaklık gradyentinde farklı katıla tırma hızlarında katıla tırılmı ve katıla tırma hızının malzemelerin mikroyapı, mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel özdirenç üzerine etkileri ara tırılmı tır. Ayrıca bu ala ımlara ait erime sıcaklı 1, entalpisi ve öz ısı de erleri de tespit edilmi tir. Böylece ele alınan ala ım sistemlerinin birçok fiziksel özelli i bir bütün olarak tanımlanmı tır.

Bu bölümde, katıla tırma çalı malarının gerçekle tirilmesinde kullanılan deney sistemi ve bir kontrollü katıla tırma deneyinin yapılı ının tüm a amaları ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

3.2. Döküm ve Katıla tırma Sistemleri

Bu tez çalı masında ala ımların üretilmesinde ve kontrollü katıla tırılmasında üç farklı fırın kullanılmı tır. Bu fırınlar; vakumlu eritme fırını, döküm fırını ve kontrollü katıla tırma fırınlarıdır.

3.2.1. Vakumlu Eritme Fırını

Bu fırın, ala ım yapılacak metallerin vakumlu ortamda oksitlenmeden eritilmesinde kullanılır. Vakumlu eritme fırınının foto rafı ekil 3.1a'da verilmi tir. ematik gösterimi ise ekil 3.1b'de verilen vakumlu eritme fırını, iç içe geçmi iki alümina tüp, vakum pompası, sıcaklık kontrolcüsü, sabit güç vermekte kullanılan varyak ve so utma



ekil 3.1. Vakumlu eritme fırınının (a) Foto rafı, (b) ematik gösterimi.

sisteminden olu maktadır. çteki alümina tüp 50 mmx60 mmx700 mm olup bir ucu kapalıdır. Bu alümina tüpün içinde vakumlu ortam sa lanır. Dı alümina tüpün ebatları ise 80 mm×90 mm×500 mm olup her iki ucu da açıktır. Dı alümina tüpün etrafına 1,2 mm kalınlı ındaki Kanthal A1 telinden (FeCrAl ala ımından yapılmı tel) 80 sarım sarılmı ve toplam direnci 28,1 Ω 'dur. Isıtıcı tellerin birbirine de memesi için tel seramik boncuktan geçirilerek sarılmı tır ve tellerin etrafı revatman ile sıvanmı tır. Fırının ısı kaybını önlemek için alümina tüplerin etrafına gaz beton (Ytong) tu lası ve cam yünü (kaowool) yerle tirilmi tir. Vakumlu ortam olu turabilmek için bir ucu kapalı alümina tüpün açık ucuna vakum pompasını ba layacak ekilde pirinçten bir so utma sistemi yapılmı tır. Vakumlama esnasında hava sızmaması için iç alümina tüp ile pirinç so utma sisteminin arası zift ile yalıtılmı tır. Fırını ısıtıldı ında ziftin erimemesi için sürekli su dolandırılmaktadır. Fırının çalı ma sıcaklı 1 1100 °C olup sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmektedir. Eritme i lemi vakum pompası yardımıyla 10⁻³ mbar basınç altında yapılmaktadır.

3.2.2. Döküm Fırını

Döküm fırını, erimi haldeki ala ımın özel numune kalıbı içerisine dökümünün yapılması ve ala ımın kalıp içerisinde tek yönlü (do rusal) olarak katıla tırılması, numuneler içerisinde hava bo lu unun kalmaması ve numune kalıplarının tamamen dolması için kullanılmaktadır. Döküm fırınının foto rafı ve ematik gösterimi ekil 3.2'de verilmi tir.

Döküm fırını; iki ucu açık alümina tüp, alt ısıtıcı, üst ısıtıcı ve so utma sisteminden olu maktadır. 50 mmx60 mmx750 mm ebatlarında olan alümina tüpün üst bölgesine 16,7 Ω , alt bölgesine 9,7 Ω olacak ekilde kanthal A1 teli sarılarak iki farklı ısıtma bölgesi olu turulmu tur. Isıtıcı tellerin birbirine de memesi için tel seramik boncuktan geçirilerek sarılmı ve tellerin etrafı revatman ile sıvanmı tır. Alt ve üst ısıtıcıların sıcaklıklarını ölçmek için ısıtıcıya yakın mesafelere iki adet yalıtılmı K-tipi termal çift yerle tirilmi tir. Alümina tüpün alt tarafına 40 mm çapında ve 160 mm uzunlu unda silindirik bir su kazanı yerle tirilmi tir. Alümina tüpün etrafı ise ısı yalıtımı amacı ile gaz beton (ytong) tu lası ile kaplanmı tır. Döküm fırını 1100°C'ye kadar (± 2°C hassaslıkta) çıkabilmektedir.



ekil 3.2. Döküm fırınının (a) Foto rafı, (b) ematik gösterimi.

3.2.3. Kontrollü Katıla tırma Fırını

Sıcak döküm fırınında elde edilen numunelerin, de i ik sıcaklık gradyenti ve hızlarda katıla tırılması, kontrollü katıla tırma fırınında yapılabilmektedir.

ekil 3.3'de gösterilen kontrollü katıla tırma fırınında, de i ik katıla ma hızları elde etmek için kullanılan motor ba lantılı bir sürücü sistem, farklı sıcaklık gradyenti olu turmak için kullanılan ısıtıcı ve so utucu sistemler bulunmaktadır. Bu fırında numune tutucusuna yerle tirilen numuneler, sürücü sistem vasıtasıyla sıcak bölgeden so uk bölgeye çekilirken, kalıp içerisindeki sıvı ala ım, en alt kısımdan ba layarak katıla makta ve katı-sıvı arayüzeyi yukarı yönde ilerlemektedir.

Kontrollü katıla tırma fırınının çalı ma sıcaklı 1 1100 °C olup, fırına takılan numune içerisinde 10 ile 100 °C/cm arasında sıcaklık gradyenti olu turulabilmektedir. Bridgman tipi kontrollü katıla tırma fırını ba lıca *ısıtıcı sistem, so utucu sistem* ve *sürücü sistem* olmak üzere üç kısımdan olu maktadır. imdi bu kısımları detaylı bir ekilde inceleyelim.

3.2.3.1. Isıtıcı Sistem

Isitici sistem, yüksek sıcaklıklara dayanıklı 50 mmx60 mmx800 mm ebatlarında olan iki ucu açık alümina tüp etrafına 1 mm çapında, toplam direnci 25 Ω olan Cr-Ni tel, 300 mm'lik bölgeye sarılarak yapılmı tır. Alümina tüpün iki ucuna pirinçten yapılmı dairesel kesitli kaideler geçirilmi tir. Alümina tüp ile pirinç kaideler arasındaki bo luk 180°C'ye dayanıklı zift (black wax) ile doldurulmu ve böylece numunenin argon atmosferinde kalması sa lanmı tır. Dolgu ziftinin a ırı ısınmasını önlemek ve pirinç kaideyi so uk tutmak için kaidelerin içerisinden sürekli su dolanımı yapılmı tır. Fırının sıcaklı ını kontrol etmek için 0,5 mm çapında yalıtılmı , metal kaplı K-tipi termal çift sıcak bölgenin tam ortasına yerle tirilmi tir. Ayrıca üst bölgede pirinç kapak ile pirinç kaide arasından hava sızmaması için lastik halka (O'ring) yerle tirilmi tir. Kontrollü katıla tırma fırınının ısıtıcı sistemi $\pm 0,1$ °C hassasiyetinde 2604S Eurotherm sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmi tir.

3.2.3.2. So utucu Sistem

So utma sistemi, firin içerisinde sıcaklık gradyenti olu turmak amacıyla tasarlanmı tır. Yeterli uzunlukta katıla tırılan numune, aniden so utma bölgesine (iç su havuzuna) çekilerek ani so utma (quench) sa lanmaktadır. So utucu sistem, 300 mm uzunlu unda 23 mm ve 33 mm çaplara sahip iç içe geçmi iki pirinç borudan olu maktadır. Pirinç boruların alt kısmı yakla ık 10 mm kalınlı ında, 100 mm çapında dairesel pirinç parçaya kaynatılmı tır. Dolayısıyla so utucu sistem iç içe geçmi iki silindirin (iç ve dı silindir) olu turdu u bir havuzdan yapılmı tır. Numune do rudan havuza çekilmektedir.

Havuzlardaki suyun sıcaklı ı, ±0,01°C hassasiyetinde -40°C ile 200°C sıcaklık aralı ında çalı abilen PolyScience dijital kontrollü ısıtmalı/so utmalı akı kan dolanım sistemi ile kontrol edilmektedir. Dolanım sisteminden gelen akı kan (antifrizli su) ilk olarak havuzun taban kısmından girmekte, havuzda belli bir seviyeye kadar birikmekte ve sonrada fırını terk ederek dolanım sistemine geri dönmektedir. Böylece havuz ve içerisindeki akı kanın sürekli so uk kalması sa lanabilmektedir. Dolanım sisteminin akı kan tankı 13 l hacmindedir ve bu tank içerisindeki akı kan belli bir sıcaklık aralı ında (-40°C ile 200°C) hem ısıtılıp hem de so utulabilmektedir. Ayrıca dolanım sisteminin tankında bulunan akı kanın, fırın içerisinde istenilen hızda dolanımı sa lanabilmekte yani dolanım sisteminin akı kanı pompalama hızı ayarlanabilmektedir.

3.2.3.3. Sürücü Sistem

Farklı katıla tırma hızları elde etmek amacı ile kullanılan sürücü sistem, 540 mm boyunda ve 40 mm çapında pirinç gövde içerisinde bulunan, dı çapı 12 mm, iç çapı 10 mm, uzunlu u 650 mm olan Cr-Ni borudan olu maktadır. Üzerinde cetvel ölçe i bulunan sürücü sistemin alt kısmında, de i ik katıla tırma hızları sa layan sürücü mile ba lı senkronize motor bulunmaktadır. Pirinç gövde içerisindeki Cr-Ni boru, alt ucundan fiberglastan yapılmı mil yuvasına, üst ucundan da numune tutucusuna sabitle tirilmi tir. Cr-Ni borunun kenarlarından su sızıntılarını önlemek amacıyla lastik halkalar kullanılmı tır. Pirinç gövde içerisine yerle tirilmi fiberglas, 65 mm uzunlu undadır. Fiberglas'ın bir ucu 12 mm çapındaki Cr-Ni boruyu sıkı bir ekilde geçebilmesi için delinmi tir. Di er ucuna ise sürücü milin içinde hareket edebilmesi için 20 mm çapında 30 mm uzunlu unda pirinç blok yerle tirilmi tir. Bu parçanın merkezine 3 mm çapında metrik di açılmı tır. Sürücü mil çelikten yapılmı olup buna



ekil 3.3. Bridgman tipi kontrollü katıla tırma fırını [5].

3 mm'lik metrik di açılmı tır. Numune bu çelik mil vasıtasıyla motor devir hızına ba lı olarak, so uk bölgeye do ru çekilip, dü ey do rultuda kontrollü olarak katıla ması sa lanmaktadır.

3.3. Kontrollü Katıla tırma Deneyinin Yapılı 1

Bir kontrollü katıla tırma deneyi; numunenin hazırlanması, katıla tırma fırınında kontrollü katıla tırılması, metalografik i lemler ve ortaya çıkan mikroyapıların gözlenmesi basamaklarından olu maktadır. lerleyen ba lıklarda bu basamakların her birini ayrıntılı bir ekilde incelenmi tir.

3.3.1. Numunenin Hazırlanması

3.3.1.1. Numune Potası, Alt–Üst Destek ve Koruyucu Yapımı

Saf elementlerden ala 1m olu turmak için 40 mm çapında, 250 mm uzunlu unda silindir eklindeki grafit parçadan iç çapı 30 mm, delik derinli i 200 mm olacak ekilde bir ucu kapalı grafit potalar tornada hazırlanmı tır (ekil 3.4). Numune hazırlanmasında kullanılan grafit; iyi ısı iletkenli ine (119–165 W.m⁻¹.K⁻¹), yüksek erime noktasına (3500°C), kolay i lenebilme özelliklerine sahip olması ve metalik ala ımlarla reaksiyona girmemesi nedeniyle tercih edilmi tir.



ekil 3.4. (a) Grafit potanın foto rafı, (b) Grafit potanın ematik gösterimi.

Aynı bile ime sahip her bir ala ım sistemini numune kalıplarına doldurmak amacıyla numune tutucu kalıbının hazırlanmasına ihtiyaç duyulmu tur. Numune tutucusu, alt ve üst olmak üzere 2 adet grafit destekten olu maktadır. Alt destek ala ım olu turmak için hazırlanan grafit potayla aynı boyutlarda olup üst destek 60 mm uzunlu unda, 40 mm çapında bir grafit parçadan yapılmı tır. Grafit parçanın bir ucu 30 mm çapında matkap ucu kullanılarak 40 mm uzunlu unda delinmi tir. Di er ucuna ise 3 mm çapında 20 mm uzunlu unda 13 adet delik açılmı tır. Bu delikler 6,5 mm çapındaki matkap ucuyla 10 mm uzunlu unda geni letilmi tir (ekil 3.5).



ekil 3.5. Numune üst tutucusunun foto rafı.



ekil 3.6. Numune üzerinde düzgün bir sıcaklık akı 1 sa lamak için kullanılan koruyucu grafitin (a) Foto rafı, (b) ematik gösterimi.

Kontrollü katıla tırma esnasında numune üzerinde düzgün bir 1s1 akı 1 sa lamak için kullanılan koruyucu da 40 mm çapında, 200 mm uzunlu unda silindir eklindeki grafit parçadan iç çapı 25 mm iki ucu açık olacak ekilde tornada hazırlanmı tır (ekil 3.6). Böylece kontrollü katıla tırılan numune üzerinde tek yönlü bir 1s1 akı 1 sa lanmı ve sıcaklık gradyentinin hassasiyeti artırılmı olacaktır.

3.3.1.2. Numune Kalıbının Hazırlanması

Ala ımın yerle tirilece i numune kalıpları için 200 mm uzunlu unda ve 6,5 mm çapında grafit çubuklar kullanılmı tır. Bu grafit çubuklar delinme esnasında kolayca kırılabildikleri için, pirinçten yapılmı kalıbın (ekil 3.7a) içine yerle tirilerek 4 mm çapında 220 mm uzunlu unda özel matkap uçları ile tornada delinmi ve böylece içi bo bir ucu kapalı bir ucu açık grafit kalıplar elde edilmi tir (ekil 3.7b). Kapalı uçlarından 1,2 mm dı çapında 0,8 mm iç çapında kılcal alümina tüp yerle tirilecek ekilde yeniden delinmi tir. Böylece kontrollü katıla tırma esnasında bu alümina tüpler içine yerle tirilen K–tipi termal çiftler vasıtasıyla katıla tırma hızı ve sıcaklık gradyenti ölçülebilecektir.



ekil 3.7. (a) Grafitlerin i lenmesinde kullanılan pirinç destek ve de i ik ebatlarda matkap uçlarının foto rafı, (b) Grafit numune kalıbı,
(c) Üst destek ile numune kalıplarının silikon yapı tırıcı yardımıyla birle tirilmesi.

Hazırlanan numune kalıplarının, 1,2 mm çapında delinmi uçlarına bir ucu kapalı alümina tüplerin yerle tirilmesinde ve 4 mm çapında delinmi uçlarınında üst destek ile birle tirilmesinde, 1200°C'ye dayanıklı karbon katkılı silikon yapı tırıcı kullanılmı tır (ekil 3.7c). Üst destek ile numune kalıpları arasına sürülen silikonların kuruması için yakla ık bir gün süreyle beklenmi tir.

3.3.1.3. Ala ımların Dökümlerinin Yapılması

Ala ım yapımı için alüminyum %99,99, silisyum %99,9, bakır %99,97, kobalt %99,9, nikel %99,97, antimon %99,98, bizmut %99,9 saflıkta metaller kullanıldı. Her bir bile en, uygun oranlarda 0,1 mg'a duyarlı AND GX-600 tipi hassas terazi ile tartıldıktan sonra erime sıcaklı ı dü ük olan metal altta kalacak ekilde grafit potaya konularak vakum fırınına yerle tirildi. Varyak en dü ük güç durumunda çalı tırıldı ve yakla ık her 5 dakikada varya ın de eri %5 artırıldı. Varya ın de erinin artırılmasına fırın istenilen sıcaklı a çıkıncaya kadar devam edildi. Metaller tamamen eridikten sonra vakum kapa ı açılarak grafit karı tırıcı çubuk yardımıyla metal eriyik karı tırıldı. Bu i lem 20-25 dakika arayla 4-5 defa tekrarlanarak belirlenen bile imdeki metalik ala ım hazırlanmı oldu.

Vakumlu eritme fırınında ala ım hazırlama i lemleri devam ederken di er taraftan döküm fırınında dökümün yapılması ve önceden yapılan numune kalıplarına ala ımın doldurulması hazırlıklarına ba landı. Numune potalarıyla desteklenen numune kalıplarının etrafı cam pamu u ile sarılarak çevresine sarılan tel yardımıyla fırına indirildi. Döküm sırasında sıvı ala ımın dı arıya ta ıp fırına sızmasını engellemek için grafit huni ile alümina tüp arasına yüksek sıcaklı a dayanıklı cam pamu u sıkı tırıldı. Fırının alt ve üst ısıtıcılarına güç verilerek varyaklar yava yava artırılarak ala ımın erime sıcaklı ının yakla ık 50°C üzerindeki bir sıcaklı a çıkması sa landı. Burada amaç döküm fırınına yerle tirilen numune kalıplarına dökülerek ala ımın akı kanlı ını koruması ve bu esnada katıla madan kalıp içlerine tam bir dolum yapılabilmesidir.

Vakumlu eritme fırınında hazırlanan eriyik haldeki ala ımla dolu grafit potası ma a ve huni yardımıyla numune kalıplarına döküldü (ekil 3.8). Döküm i leminden sonra huni çıkarıldı ve daha sonra döküm fırınının alt ısıtıcısı kapatıldı, üst ısıtıcı çalı ır haldeyken numune kalıbının altında bulunan so utma kazanından su geçirilerek tek yönlü katıla tırma ba latıldı. Tek yönlü katıla tırmanın amacı numune kalıbının içerisinde hava bo lu u kalmaksızın tamamen doldurulmasıdır. Katıla ma tamamlandıktan sonra üst ısıtıcı da kapatılarak fırının so uması beklendi. Fırın tamamen so uduktan sonra, dökümü yapılan grafit numune kalıpları fırından çıkarıldı. Üst ve alt destek kısımları numune kalıplarından ayırt edildi. Böylece her bir numune kalıbının aynı anda aynı tür malzemeyle dolması sa lanarak, numuneler kontrollü katıla tırma fırına yerle tirilecek hale getirildi.



ekil 3.8. Grafitten yapılmı (a) Pota ve (b) Huninin ematik gösterimi [46].

3.3.1.4. Termal Çift Seçimi ve Sıcaklık Ölçümleri

Termal çiftler, fırınlarda ısıtılan numunelerin sıcaklı ını ölçmek ve kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Deneysel çalı malarda yaygın olarak Kromel-Alumel (*K*-tipi) ve Platin-%13 Platin-Rodyum (*R*-tipi) olmak üzere iki tür termal çift kullanılmaktadır. Deneyler esnasında sıcaklık ölçümlerini yapabilmek için 0,25 mm

çapında 100 cm uzunlu unda, -270° C ile 1370°C aralı ında ölçüm yapabilen, *K*-tipi termal çiftler kullanıldı (ekil 3.9).



ekil 3.9. Numunelerin sıcaklıklarının ölçümünde kullanılan K-tipi termal çiftler.

Deneylerde kullanılan termal çiftlerin, çapları 0,25 mm olması, deneysel çalı malarda kolaylık sa lamakta ve hassasiyeti artırmaktadır. Bu termal çiftlerin iç tarafındaki kontak noktası seramik tozla yalıtılmı ve yüzeyi metalle kaplanmı oldu u için ayrıca bir yalıtıma ihtiyaç duyulmamaktadır. Kontak uç, sıcaklı ı ölçülecek bölgeye yerle tirilirken, di er uçlar referans sıcaklı ında (0°C'de antifrizli su) tutulmaktadır. Bu amaçla *PolyScience* analog kontrollü ısıtmalı/so utmalı akı kan dolanım sisteminin akı kan tankı kullanılmı tır.

Referans noktasını sabitlemede kullanılan analog dolanım sistemi, tank içerisinde bulunan akı kanı -20°C ile 100°C sıcaklık aralı ında $\pm 0,2$ °C hassasiyetle kontrol edebilme özelli ine sahip olup 6 l hacmindedir. Dolayısıyla sıcaklık ölçümünde kullanılan termal çiftlerin bir uçları sıcaklı ı ölçülecek bölgeye yerle tirildikten sonra, di er uçları içerisinde etil alkol bulunan bir cam tüp içerisine yerle tirilerek dolanım sisteminin tankı içerisine sabitlendi. Cam i e içlerinde etil alkolün kullanılmasının nedeni, ısı iletkenli inin havanın ısı iletkenli inden daha yüksek olması ve tank içerisindeki ısıyı termal çift uçlarına daha iyi iletmesindendir. Dolanım sisteminin tankına ise antifrizli su (etilen glikol çözeltisi) doldurularak referans sıcaklı ı olan 0°C'de akı kanın donması engellendi. Sistemde sıcak bölge ile so uk bölge arasında bir e.m.k. olu makta ve bu olu an e.m.k. μV mertebesinde hassas ölçüm yapan sıcaklık kaydedicisi yardımıyla okunarak ^oC birimine dönü türmektedir. Böylece fırın içerisindeki numune sıcaklı ı belirlenmektedir. Kullanılan termal çiftlerin (-270^oC ile 1370^oC) ölçüm aralıkları, deneysel çalı malardaki ölçüm aralıkları ile uyumlu oldu undan dolayı hassas ve duyarlı bir ekilde ölçümler alınabilmi tir.

Ala ımın erime sıcaklı ının tayininde (kalibrasyon), katıla tırma süreci devam ederken numune içerisinde olu an sıcaklık gradyentinin ölçümünde ve ani so utma anında ölçüm termal çiftlerinin sıcaklık de i imlerinin kaydedilmesinde sıcaklık kaydedicisi (data logger) kullanılmı tır. Kontrollü katıla tırma deneylerinde ölçüm termal çiftlerinin sıcaklık de i imlerinin kaydında Pico TC-08 model sıcaklık kaydedicisi kullanılmı ve veriler bilgisayar ortamına kaydedilmi tir. Kullanılan sıcaklık kaydedicisinin foto rafı ekil 3.10'da verilmi tir.



ekil 3.10. Sıcaklık de i imlerinin kaydedilmesinde kullanılan Pico TC-08 model sıcaklık kaydedicisi.

3.3.2. Kontrollü Katıla tırma Deneyi

Kontrollü katıla tırma deney düzene i; yukarıda ayrıntılı özellikleri anlatılan ala ımla doldurulan grafit numune kalıplarının kontrollü olarak dü ey do rultuda katıla tırıldı 1 fırını, sıcaklık kontrol ünitesi, varyak, senkronize motor, yön kontrol ünitesi, argon

pozitif basınç ünitesi, akı ölçer (flowmeter), su dolanım sistemi, sıcaklık kaydedicisi (data logger) ve bilgisayardan olu maktadır.

Dökümü yapılan numunelerin her biri ekil 3.11'deki kontrollü katıla tırma fırınının numune tutucusuna yerle tirilerek termal çift çıkı ları 5 terminali bulunan selektöre ba landı. Fırının ba lantı uçları, içerisinde etil alkolün bulundu u cam tüp borular içerisine konularak içerisinde 0°C'de antifrizli su bulunan analog dola ım sisteminin tankının içerisine yerle tirildi (burada amaç referans sıcaklı ını 0°C yapmaktır).



ekil 3.11. Deney sisteminin ematik gösterimi [143].

Bu i lemden sonra so utma havuzu giri ve çıkı ba lantıları ve istenilen hızdaki senkronize motor ba lantıları yapılarak deney düzene i kuruldu. So utma havuzundaki akı kanın sıcaklı 1 istenen düzeye geldikten sonra sisteme argon gazı verildi. Numune

üzerindeki sıcaklık akı ının kararlı hale gelmesi için yakla ık 2 saat kadar beklendi. Daha sonra sürücü motor çalı tırılarak deney ba latıldı. Numune yakla ık 7-9 cm katıla tıktan sonra ani so utma (quench) yapılarak katıla tırma durduruldu. Ani so utma i lemi numunenin kontrollü katıla tırılma i lemi devam ederken, hızla so uk su havuzuna çekilerek o anki haliyle katıla tırılmasıdır.

Bu i lem 5 faklı katıla ma hızında iki er adet olmak üzere her bir ala ım için (Al-Si-Ni, Al-Si-Bi, Al-Si-Cu, Al-Si-Sb ve Al-Si-Co) 10 defa tekrarlandı. ki er adet yapılmasının nedeni ise ilk yapılan deneylerde katıla tırma hızlarını ve malzemenin sıcaklık gradyentini belirlemek amacıyla içine termal çiftlerin yerle tirilece i alümina tüpler konulmasıdır. çine alümina tüp konulan numunelerden çekme-dayanımı testi güvenilir sonuçlar vermeyecektir. Bu nedenle de aynı artlar altında iki deney yapılmı tır.

3.3.2.1. Sıcaklık Gradyenti ve Katıla tırma Hızının Ölçülmesi

Kontrollü katıla tırma deneylerinde kontrol parametrelerden birisi sıcaklık gradyentidir. Deney sisteminde kullanılan Bridgman tipi kontrollü katıla tırma fırını dü ey olarak tasarlandı ından içerisindeki numune a a ıdan yukarıya do ru katıla maktadır. Numune içerisindeki kılcal alümina tüpün içine yerle tirilen üç *K*-tipi termal çift ve sıcaklık kaydedicisi yardımıyla numunenin sıcaklı ı tespit edildi. Numune katıla tırılırken, birinci termal çift katı-sıvı arayüzeyine geldi inde ikinci ve üçüncü termal çiftlerin sıcaklıkları ölçüldü. Buradan;

$$G_{12} = \frac{T}{X} = \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1}, \ G_{23} = \frac{T}{X} = \frac{T_3 - T_2}{X_3 - X_2} \text{ veya } G_{13} = \frac{T}{X} = \frac{T_3 - T_1}{X_3 - X_1}$$
(3.1)

denklemleri yardımıyla sıvı içerisindeki sıcaklık gradyenti G_s , üç farklı noktadan ölçüldü. T_1 , T_2 ve T_3 sırasıyla 1., 2. ve 3. termal çiftlerin ölçtü ü sıcaklık, X_1 , X_2 ve X_3 ise sırasıyla 1., 2. ve 3. termal çiftlerin numune tabanına olan uzaklıklarıdır.

Deney esnasında termal çiftler arasındaki mesafelerin de i memesi ve sıcaklık gradyenti ölçümlerinin daha hassas olabilmesi için kalıp içerisine yerle tirilen termal çiftler numune kalıbı hazırlama sürecinde birbirlerine yapı tırılmı ve yüksek sıcaklık silikonu yardımıyla kalıbın alt kısmına sabitlenmi tir. Deneyler yapılmadan önce ve deneyler tamamlandıktan sonra birbirine tutturulmu termal çiftler arasındaki mesafeleri

hassas bir ekilde ölçülmü tür. Termal çiftler arasındaki mesafelerin hassas bir ekilde ölçümü sıcaklık gradyenti hesaplamalarında güvenilirli i artırmaktadır.

Kontrollü katıla tırma deneylerinde kontrol parametrelerinden bir di eri ise katıla tırma hızıdır. Katıla ma hızı, sürücü motor vasıtasıyla elde edilen çekme hızından farklıdır. Çekme hızı numunenin motor yardımıyla so utucu sisteme do ru çekilme hızıdır. Katıla ma hızı ise numune içerisinde olu an katı-sıvı arayüzeyinin ilerleme hızıdır. Çekme hızı arttıkça katıla ma hızı artmaktadır. Farklı sıcaklık gradyentleri için katıla tırma hızını, çekme hızına e it olarak almak yeterince hassas de ildir.

Deneylerde hem çekme hızı hem de katıla tırma hızı hassas bir ekilde ölçülmü fakat hesaplamalarda sadece katıla tırma hızı kullanılmı tır. ekil 3.12'de bazı senkronize hız motorlarının foto rafı verilmektedir.



ekil 3.12. Numunelerin farklı hızlarda katıla tırılmasını sa layan senkronize hız motorları.

Katıla ma hızı u ekilde ölçülmü tür; Katıla tırma devam ederken sıcaklık kaydedici tarafından sıcaklık-zaman de i imini sürekli olarak kaydedilmektedir. Katıla tırma i lemi bitti inde sıcaklık kaydedicinin topladı 1 veriler yardımıyla ikinci termal çiftin ötektik erime sıcaklı ına geldi indeki süre (t_2) ve üçüncü termal çiftin ötektik sıcaklı a

geldi indeki süre (t_3) saniye cinsinden ölçüldü. kinci ve üçüncü termal çift arasındaki mesafe önceden bilindi inden,

$$V = \frac{\mathsf{U}X}{\mathsf{U}t} = \frac{X_3 - X_2}{t_3 - t_2} \qquad (\ \sim m/s\) \tag{3.2}$$

denklemi yardımıyla katıla tırma hızı hesaplandı. Al-Si-Cu, Al-Si-Co, Al-Si-Ni, Al-Si-Sb ve Al-Si-Bi ala ım sistemleri için katıla tırma hızları birbirlerine çok yakın olması nedeniyle ortalamaları alınarak genel bir de erlendirme yapılmı tır.

3.3.3. Metalografik lemler

Katıla ma sonucu olu an mikroyapıyı gözleyebilmek için numune metalografik i lemlere tabi tutulmalıdır. Bunun için ani so utulmu numune kontrollü katıla tırma fırınından çıkarıldı. Numunelerin kesilmesi, zımparalanması, kalıplanması, parlatılması, ultrasonik temizlenmesi ve da lanması gibi metalografik i lemler sonunda, açı a çıkan mikroyapıların foto rafları taramalı elektron mikroskobuyla (*SEM*) çekildi. Bu süreçler a a ıda ayrıntılı olarak anlatılmı tır.

3.3.3.1. Numunelerin Kesilmesi

Bridgman tipi kontrollü katıla tırma fırınından çıkarılan numunenin grafit kalıbı, numuneye zarar vermeyecek ekilde itina ile çıkarıldı. Numune bir yüzeyinden boyuna parlatılarak arayüzeyin yeri tespit edildi. Daha sonra kesme robotu yardımıyla arayüzeye en yakın katı ve sıvı bölgelerinden parçalar dü ük hızda kesildi. Aynı i lem üretilen her bir numune için tekrarlandı. Enine ve boyuna kesitleri alınan numuneler, kalıplamaya ve zımparalamaya hazır hale getirilmi oldu.

Bu çalı mada enine ve boyuna kesitleri alınan numuneler so uk kalıplama yöntemi kullanılarak epoksi-resin ile kalıplandı. Numunenin boyutlarına uygun, plastikten yapılmı kalıplar içine numuneler yerle tirildi. Numune, üzerine kalıplama için hazırlanan epoksi-resin karı ımının dökülmesi esnasında kaymaması için sabitlendi. Epoksi ve sertle tirici 7/1 oranında karı tırılarak kalıba döküldü ve sertle meye bırakıldı. Epoksi-resin yakla ık 8 saat içerisinde sertle ti. Bu süre sonunda kalıp etrafındaki plastik çıkartılarak zımparalamaya hazır hale getirildi.

ekil 3.13'de kontrollü olarak katıla tırılan numunenin grafit kalıptan çıkarılması, arayüzeyin belirlenmesi, arayüzeyden boyuna ve enine kesitlerin alınması ve epoksiresin ile kalıplanması sürecinin foto rafları verilmi tir.



ekil 3.13. Numune kalıbının olu turulmasından epoksi-resin ile kalıplanması sürecine kadar ki her bir a amanın gösterimi.

3.3.3.2. Numunelerin Zımparalanması

Numunelerin zımparalanması silisyum karbür (SiC) taneleri ve magnetit tozu içeren zımpara kâ ıtlarıyla yapıldı. Zımpara kâ ıtlarında birim alana dü en tane sayısı (grid) arttıkça mikron cinsinden tane boyutu azalmaktadır. 80-600 gridler kaba, 800-2500 gridler ise ince zımpara olarak sınıflandırılmaktadır.

Numuneler, 80 gridlik zımpara kâ ıdından ba layarak 2500 gride kadar, kabadan inceye do ru kademeli olarak zımparalandı. Numunelerin zımparalanmasında kullanılan bazı zımpara kâ ıtlarının foto rafı ekil 3.14a'da verilmektedir.

Her bir numune kaba zımparalarla 10-15 dakika, ince zımparalarla ise 20-25 dakika süreyle zımparalandı. Numune yüzeyinde zımparalama i lemiyle olu an ekil de i ikli inin ematik gösterimi ekil 3.14b'de verilmektedir.



ekil 3.14. Kesme robotu ile kesilmi numunedeki yüzey durumu (A, B, C) tabakaları zımparalama i lemiyle olu an ekil de i ikliklerini D ise orijinal iç yapıyı göstermektedir [144].

3.3.3.3. Numunelerin Parlatılması

Zımparalama ve parlatma i lemleri Struers TegraPol-15 tipi otomatik parlatma robotu ile yapıldı (ekil 3.15). Öncelikle parlatma robotun disklerine farklı tane büyüklüklerine sahip zımparalar takıldı. Cihazın su modu açılarak numunelere sulu zımparalama yapması sa landı. Böylelikle numunenin hem ısınması engellendi hem de homojen bir temas sa landı.

Her bir zımparalama kademesinden sonra numune yüzeyinin düz olmasına ve derin çiziklerin giderilmi olmasına dikkat edildi. Daha sonra dönü hızı ve numuneye uygulanan basınç de eri ayarlanabilen otomatik parlatma robotunun disklerine, parlatılacak numuneye uygun parlatma kuma ları takıldı. Kaba ve ince parlatma için farklı tane büyüklü üne sahip elmas süspansiyonlar kullanıldı.

Parlatma i leminde kullanılan elmas süspansiyonlar sırasıyla 6 µm, 3 µm, 1 µm, 0,25 µm ve 0,05 µm tane büyüklü üne sahip elmas çözeltilerdir. Parlatma sırasında her bir elmas süspansiyon için ayrı metal diskler üzerine yapı tırılmı parlatma kuma ları kullanıldı. Numune ile parlatma kuma 1 arasında yumu ak bir temas sa lamak ve nem miktarını ayarlamak amacıyla parlatıcı ile birlikte Struers Depif ya layıcı (lubrikant) kullanıldı.



ekil 3.15. Otomatik parlatma robotu.

 $6 \mu m$, $3 \mu m$ ve $1 \mu m'lik$ parlatma çözeltileri kullanılırken numune üzerine her numunede farklı olmak üzere kuvvet (20-50 N) uygulandı. 0,25 μm ve 0,05 $\mu m'lik$ parlatma çözeltileri kullanılırken uygulanan kuvvetin büyüklü ü azaltıldı.

Parlatma sırasında elmas çözeltinin disk üzerinde homojen da ılmasına dikkat edildi. Her a ama sonunda numune bol damıtık su ile yıkandı. Numunelerin parlatılmasında kullanılan parlatma kuma ları ve parlatma süspansiyonları ekil 3.16'da verilmektedir. 0.05 µm'lik çözelti ile yapılan parlatma kademesinin sonunda disk üzerine saf su sıkılarak numune iyice temizlendi. Artık numune yüzeyi da lanmaya hazır duruma gelmi tir. Tablo 3.1'de bu çalı mada kullanılan çözelti ve kuma ların özellikleri verilmektedir.



ekil 3.16. Numunelerin parlatılmasında kullanılan (a) Kuma lar ve (b) Süspansiyonlar.

Tablo 3.1. Parlatmada kullanılan çözelti ve kuma lar.

Çözeltinin Tane Büyüklü ü	Çözeltinin Özelli i	Parlatma Kuma 1	Kullanılan Ya layıcı
6 μm	Struers Elmas Çözelti	Struers Polifloc3	Struers Depif
	Monokristal, Samex	200 mm çapında	Mavi renkli
3 µm	Struers Elmas Çözelti	Struers Polifloc3	Struers Depif
	Monokristal, Samte	200 mm çapında	Mavi renkli
1 μm	Struers Elmas Çözelti	Struers Polifloc3	Struers Depif
	Monokristal, Samno	200 mm çapında	Mavi renkli
0,25 μm	Struers Elmas Çözelti	Struers Policel2	Struers Depif
	Polikristal, Sapuq	200 mm çapında	Mavi renkli
0,05 µm	Struers Alümina Çözelti	Struers Policel2 200 mm çapında	Damıtık Su

Her malzemenin parlatılması birbirinden farklılıklar gösterebilmektedir. Yumu ak malzemenin parlatılması sürecinde malzemenin taneleri parlatılan yüzeye yapı arak yapıyı kapatmaktadır. Dolayısıyla her bir parlatma kademesinde yüzeyde olu an tabakanın temizlenmesi gerekmektedir. Sert malzemelerde ise parlatma esnasında üzerine oldukça yüksek (50 N) bir kuvvet uygulamak gerekmektedir. Bu tez çalı masında belirlenen ala ımların hepsi (Al-Si-Cu, Al-Si-Co, Al-Si-Ni, Al-Si-Sb ve Al-Si-Bi) sert malzemelerdir.

3.3.3.4. Numunelerin Da lanması

Her ne kadar parlatma sonucunda numunenin yüzeyi düzgün, pürüzsüz ve parlak olsa da numune yüzeyinde kontrast olu turmadan inceleme yapmak mümkün de ildir. Mikroyapı analizi için numunenin da lanması gerekmektedir. Da lama sonucunda mikroyapı karakteristikleri ortaya çıkarılır. Metalografide iki çe it da lama vardır: elektrolitik da lama ve kimyasal da lama. Elektrolitik da lama ile yüzeyden atom tabakaları atılır. Bunun için belirli bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji, ısı veya yüksek voltaj uygulanarak sa lanabilir [144]. Kimyasal da lama ise numunenin yüzeyine uygun bir çözelti uygulanarak yapılmaktadır. Da lama i leminde en önemli nokta metalik malzeme için uygun da lama çözeltisini seçmektir.

Bu çalı mada, numunelerin tane sınırlarını ve mikroyapı özelliklerini ortaya çıkarmak için numune yüzeyine uygun bir reaktif tespit edilerek kimyasal da lama tekni i uygulandı. Kimyasal da lama i lemi; yüzeyi istenen kalitede temizlenmi ve pürüzsüz hale getirilmi numunenin, da lama çözeltisine uygun sürelerde daldırılmasıyla yapılmaktadır. Da lamanın yeterli olup olmadı ına mikroskopla numuneye bakılarak karar verilir. Da lama, tane sınırlarının açı a çıkarılması, fazların tayin edilmesi ve dislokasyonların belirlenmesi gibi durumlarda yapılmaktadır [144].

Bu çalı mada Al-Si-Cu, Al-Si-Co, Al-Si-Ni, Al-Si-Sb ve Al-Si-Bi ala ım sistemleri için metalografi kitaplarından faydalanarak uygun da layıcı çözeltileri hazırlandı. Çözelti bile enlerinin oranları de i tirilerek mikroyapıyı en iyi ortaya çıkaran da layıcı tespit edildi. Al-Si-X (X= Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) ala ım sistemleri 5 ml hidroflorik asit, 95 ml su ile hazırlanan çözeltiyle 10-15 saniye kadar da landı.

3.3.4. Mikroyapıların Gözlenmesi

Üretilen her bir numunenin uygun bölgelerinden kesitler alınıp so uk kalıplama yapıldıktan sonra metalografik i lemlere tabi tutuldu ve uygun da layıcılarla da landı. Üretilen her bir numunenin mikroyapı foto rafları taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) çekildi.

Numunlerin *SEM* foto raflarının çekilmesinde LEO 440 marka bilgisayar kontrollü dijital taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Bu mikroskop, 40 kV hızlandırma voltajlı ve Secondary - Backscattered elektron detektörüne sahip ×(5-300 000) kat büyütme kapasitelidir. Ayrıca farklı fazların tane yönelimini tespit edebilme özelli i bulunmaktadır. ekil 3.17'de kullanılan *SEM* mikroskobunun foto rafi verilmektedir.



ekil 3.17. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) foto rafı (a) Dı tan görünü , (b) çten görünü .

SEM ile foto raf çekimine geçmeden önce, parlatılmı ve da lanmı olan numuneler, kaplama ünitesine yerle tirildi ve yüzeyleri yakla ık 10-40 nm inceli inde gümü tabaka ile kaplanarak vakum altına alındı. Burada elektron demetinin yüzeyden daha iyi saçılması ve görüntünün daha iyi konstrast ve niteli e sahip olması amaçlanmı tır. Bu i lemden sonra gümü tabaka ile kaplanmı numuneler, SEM'in vakum haznesi içindeki

numune tablası kısmına yerle tirilerek numunelerin uygun bölümlerinden farklı büyütmelerde foto rafları çekildi.

3.4. Mikrosertli in Ölçülmesi

Numunelerin mikroyapı foto rafları optik görüntü sistemi ve *SEM* mikroskobuyla çekildikten sonra mikrosertlik ölçümlerine geçildi. Mikrosertlik ölçümlerinde, ematik yapısı ekil 3.18'de verilen Emco Test DuraScan model dijital mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmı tır. Bu cihaz 1 g, 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g ve 1000 g'lık yük uygulayabilen, %5 hassasiyette ölçüm alabilen ve elektronik olarak mikrosertlik de erini kendisi hesaplayabilen bir cihazdır. Kendi üzerinde foto raf çekme ünitesi olup $\times 10$, $\times 40$ ve $\times 60$ büyütme de erlerindeki objektiflerle foto raf çekebilme özelliklerine sahiptir.



ekil 3.18. (a) Mikrosertlik ölçüm cihazının foto rafı, (b) Numune üzerinde cihazın bıraktı 1 izin detayları.

Be farklı katıla tırma hızında katıla tırılan numuneler sırasıyla ölçüm cihazına ba lanarak, her bir numunenin enine kesitinden ve boyuna kesitinin katı-sıvı arayüzeyine yakın katı kesitinden 8-12 adet mikrosertlik ölçümleri alınmı tır. Ölçülen mikrosertlik de erleri kullanılarak, katıla tırma hızının ve mikroyapı parametresi de erleri ile mikrosertlik de erleri arasındaki ili ki ve ba ıntılar elde edilmi tir. Elde edilen ölçüm sonuçları 4. Bölüm'de verilmektedir.

3.5. Çekme-Dayanımının Ölçülmesi

Be farklı hızda katıla tırılan numunelerin her birinden iki er adet yapılmı tır. Çünkü çekme-dayanımı testi için en az 50 mm uzunlu unda düzgün katıla mı kesite ihtiyaç duyulmu tur. Böylece mikroyapı belirlenmesi ve elektriksel özellikler için ilk numune kullanılırken aynı artlar altında katıla tırılan ikinci numuneler çekme-dayanımı testi için kullanılmı tır (ekil 3.19).



ekil 3.19. Çekme-dayanımı ölçüm cihazının foto rafı.
Farklı katıla tırma hızlarında hazırlanan 4 mm çaplı ve en az 50 mm uzunlu undaki kontrollü katıla tırılmı numuneler Shimadzu AG-XD 50kN marka çekme-dayanımı cihazının (ekil 3.19) çeneleri arasına sıkıca yerle tirildikten sonra 5 mm/dak hızlarında çekilerek gerilme-uzama erileri elde edilmi tir. Böylece elde edilen erilerden her bir numunenin çekme-dayanımı de eri belirlenerek katıla tırma hızı ve mikroyapıyla de i iminin etkisi ortaya konulmu tur. Elde edilen ölçüm sonuçları tablo ve grafiklerle 4. Bölüm'de verilmi tir.

3.6. Elektriksel Özdirencin Ölçülmesi

Elektrikte direnç ölçümleri direnç de erinin büyüklü üne göre sınıflandırılarak uygun yöntemlerle ölçülür. Dirençler de erleri bakımından de eri 0,1 'dan küçük olanlar küçük de erli dirençler, direnç de eri 0,1-10 olanlar orta de erli dirençler ve direnç de eri 10 dan büyük olan dirençler olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Elektriksel özdirenç ölçümü bu sınıflandırmalardan genellikle küçük de erlikli direnç ölçme grubuna girmektedir.

Küçük de erlikli direnç ölçmelerinde dirençler dört uçlu yapılır ve bunların ölçülmesinde çe itli metotlar kullanılır [145]. Küçük de erlikli dirençlerin ölçülmesinde ölçme düzene ini olu turan ölçü aletleri hataları, ba lantı iletkenleri dirençleri ve ba lantı noktaları arasında meydana gelen temas dirençleri sonuca etki etmekte ve ölçülen de erin hatalı bulunmasına neden olmaktadır. Bu ölçme hatalarının en aza indirilebilmesi ve ölçme yapılabilmesi için iki nokta kontak ve dört nokta kontak metotları geli tirilmi tir.

nce metal filmlerin ve yarıiletken malzemelerin elektriksel özelliklerinin ölçülmesinde; genellikle iki nokta kontak ve dört nokta kontak metotları kullanılmaktadır. Ölçülecek örnek üzerinden akım geçerken, belirli bir bölgesinde elektrik potansiyel farkı ölçümü bu yöntemlerin temeli olup daha hassas ölçme yapılabilen dört nokta kontak metotları yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.6.1. ki Nokta Kontak Metoduyla Özdirenç Ölçme Yöntemi

ki nokta kontak metodu özdirenç ölçümlerinde kullanılan bir metot [146] olup, ölçme yapılacak örneklerin ekli düzgün dikdörtgen ve geometrik eklinde, sabit bir kesit alanına sahip olmalıdır. Ölçmede kullanılan örnek üzerinde ekil 3.20'de görüldü ü gibi akım için kullanılan 1 ve 2 numaralı omik kontaklar bulunmakta, gerilim ölçümleri (V_{34}) için akım çizgileri üzerine yerle tirilen 3 ve 4 numaralı küçük alanlı, birbirinden uzaklıkta omik kontaklar yapılmaktadır. Homojen bir örne in özdirenç de eri; a a ıdaki formül ile hesaplanır. Burada I₁₂, 1 ve 2 numaralı kontaklardan geçen sabit akım, V₃₄ 3 ve 4 numaralı kontaklar (problar) arasında olu an gerilim, d ise 3 ve 4 numaralı kontakları arasındaki uzaklıktır.



ekil 3.20. ki-problu metotla özdirenç ölçme devresi.

Akımın birimi (A), gerilim birimi (V), örnek boyutlarının birimi (cm) oldu unda, hesaplanan özdirenç birimi (Ohm.cm) dir.

... =
$$\frac{S.V_{34}}{dI_{12}}(Ohm.cm)$$
 (3.3)

3.6.2. Dört Nokta Kontak Metotları

Dört nokta kontak metodu lk olarak 1916 yılında Wenner tarafından toprak özdirencinin ölçülmesi amacıyla geli tirilmi tir [147]. Bu yöntemde topra a çakılan iki paslanmaz metal-çelik elektrot aracılı 1 ile yer içine elektrik akımı gönderilir. Yeryüzündeki di er iki noktada yerle tirilen iki elektrot yardımı ile de olu an gerilim farkı ölçülür. Elde edilen Akım (I) ve Gerilim (V) de erinden özdirenç hesap edilir. Bu yöntem jeofizikte Wenner metodu olarak bilinmektedir. Yer altının sismik ara tırmalarında da kullanılmaktadır.

1954 yılında Valdes yarıiletkenlerin özdirençlerinin ölçülmesi amacıyla bu metodu elektroni e uygulamı tır [149].

ki nokta kontak metodunda kontak dirençleri etkisi yok edilememekte ancak dört nokta kontak metoduyla bu etki en az düzeye indirilebilmekte ve hassas ölçme yapılabilmektedir [147]. Bu nedenle daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Dört nokta kontak metodu iki gurupta incelenebilir. Bunlar;

- a) Dört nokta kontak metodu
- b) Van Der Pauw metotlarıdır.

Dört nokta (prob) kontak ve Van Der Pauw Metodu birbirine benzeyen metotlardır. Ölçülecek örnekten akım geçerken, belirli bir bölgesinde elektrik potansiyel farkı ölçümleri bu metotların temelidir. Bu metotlarla ince film malzemelerin ve yarıiletkenlerin; özdirenç, iletkenlik, manyeto rezistans direnci, Seebeck etkisi ve Hall ölçümleri yapılabilmektedir. Dört nokta kontak tekni i; yarıiletken endüstrisinde, elektronik devrelerin üretimi sırasında çe itli adımlarda devre kontrollerinde ve test ölçümlerinde, fizik, kimya ve biyoloji alanlarında yüzey dirençlerinin bulunmasında kullanılmaktadır.

Dört nokta kontak metodu, genellikle ince film malzemelerin veya yarıiletken maddelerin iletkenlik ve özdirençlerinin ölçülmesinde kullanılır [149]. En az bir yüzeyi düzlemsel olmalı ve bu yüzeyin geometrik boyutları, kontak boyutlarından daha büyük olmalıdır. Dört nokta kontak metodu ile özdirenç ölçmede ölçmenin do rulu u, numunenin ekline ve boyutuna ba lıdır. Ölçümü yapılacak malzemenin boyutları mümkün oldu u kadar düzgün geometrik ekiller (kare, dikdörtgen ve daire) halinde hazırlanmalıdır. Böylece yapılacak ölçmenin do rulu u arttırılır.

Dört nokta kontak metodunda, ekil 3.21'de görülen ölçme sisteminde oldu u gibi dı taki iki kontak noktaya (A ve D) akım kayna 1 ba lanır. çteki iki kontak noktadan (B ve C) potansiyel fark ölçülür. Ölçülen akım, gerilim (I, V) de erleri ile denklem

3.4'deki formül yardımıyla elektriksel özdirenç de eri hesaplanarak bulunmaya çalı ılır. Kontaklar aynı düzlem üzerinde ve e it aralıklarda olmalıdır [145]. Birbirine e it uzaklıkta (d) yerle en dört nokta kontak sistemi kullanıldı ında, numunelerin özdirenci,

$$\dots = G.\frac{V}{I}(\Omega cm) \tag{3.4}$$

formülü ile bulunur.



ekil 3.21. Dört nokta kontak ölçme sisteminin eması.

Burada I; A ve D isimli kontaklardan geçen akımı, V; B ve C isimli kontaklar (problar) arasında olu an gerilimi verir G ise düzeltme faktörüdür [149]. Düzeltme faktörü numunenin boyutlarını ve kontakların durumunu içeren bir denklemler toplulu udur ve geometrik özdirenç düzeltme katsayısı olarak tanımlanır. Bu düzeltme faktörü numunenin kalınlı ına ve geometrik yapısına, yüzey büyüklü üne, numune kenar sınırlarının yapısına, ba lantı uçlarının numune üzerinde bulundu u konuma ve dizili düzenine ba lı olarak de i ir. Ölçme sırasında kontaklar ölçülen eklin tam ortasına temas ediyorsa düzeltme faktörü hesaba katılmaz. Ortasında de il ise geometrik faktör bulunarak hesaplamaya dahil edilir [152].

Bu tez çalı masında, hazırlanan kompozisyondaki her bir ala ımın mikroyapıya ba lı elektriksel özdirenç de erlerinin ölçümünde dört nokta kontak ölçüm metodu kullanılmı tır. Ölçümler için Keithley 2400 marka programlanabilir güç kayna ı, Keithley 2700 marka multimetre ve Protherm marka kül fırınından faydalanılmı tır (ekil 3.22).

Ölçümlerde gümü tellerin çubuk ekilli numunelere do rudan teması (konta 1) sa landı. Ölçümler, her bir numune için oda sıcaklı ında 0,1 s'de bir 100 ölçüm alınarak yapıldı. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle 4. Bölüm'de verilmi tir.



ekil 3.22. Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan düzenek foto rafı.

3.7. Entalpi ve Öz Isı Ölçülmesi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı malzemelerin termofiziksel karakterizasyonunda kullanılmaktadır. Bu teknik, incelenen numuneye ait bir fiziksel özelli in sıcaklı ın fonksiyonu olarak ölçüldü ü veya bir tepkimede so urulan ya da açı a çıkan ısının izlendi i yöntemleri içeren bir analiz tekni idir. Özellikle erime, kristallenme, faz geçi i, camsı geçi gibi özellikler do rudan ölçülmekte, entalpi

de i imi (U*H*) ve öz 1s1 (*Cp*) ise elde edilen e rilerden hesaplanmaktadır. Diferansiyel taramalı kalorimetre ile birçok malzemenin; entalpi, kristalle me sıcaklı 1, camsı geçi sıcaklı 1, 1sıl kararlılık, saflık ve curie sıcaklı 1 gibi özellikleri incelenebilmektedir.

Herhangi bir zamanda numuneye olan 1s1 akı 1 = Q/t olur. Numunenin birim zamandaki sıcaklık de i imi ise, T/t = 1s1tma hızıdır. Is1 akı 1n1, 1s1tma hızına böldü ümüz zaman, Q/T de erini, yani 1s1 s1 as1n1 (C_p) elde ederiz.

Bu tez çalı masında endüstriyel uygulamalar için büyük önem arz etti inden dolayı çalı ılan malzemelerin entalpi de i imleri (U*H*) ve özısı de i imleri (U*C_p*) de belirlendi. Bu i lem için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC - Perkin Elmer Diamond modeli) kullanılmı tır (ekil 3.23). Termal analiz için sabit atmosfer basıncı ve nitrojen so utması altında 200-1000 K sıcaklık aralı 1, 10 K/dak. ısıtma hızı de erleri kullanıldı. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle 4. Bölüm'de verilmi tir.



ekil 3.23. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı.

Bu bölümde deneysel sistem ve ekipmanları tanıtıldıktan sonra bir deneyin yapılı a amaları, numune üzerinde yapılan metalografik i lemler ve analizler anlatıldı. Bir sonraki bölümde bu tez çalı ması kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar verilerek yorumlanacak ve literatürdeki benzer çalı maların sonuçları ile kar ıla tırılacaktır.

4. BÖLÜM

SONUÇ VE TARTI MA

Bu tez çalı masında Al-%12,6Si ötektik ala ımına a ırlıkça %2 oranında Cu, Co, Ni, Sb ve Bi elementleri ayrı ayrı katkılanarak olu turulan Al-%12,6Si-%2X (a .) (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala ım sistemleri hazırlandıktan sonra kontrollü katıla tırma deneyleri yapılmı tır. Katkılanan malzemelerin mikroyapı, mikrosertlik, çekme–dayanımı, elektriksel özdirenç ve ısısal özellikleri üzerine katkı elementlerinin etkileri ara tırılmı tır. Ayrıca, hazırlanan her bir ala ım sistemi için, katıla tırma hızının ve mikroyapı parametresinin, malzemelerin mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel özdirenç de erleri üzerine etkileri ara tırılarak aralarındaki ba ıntılar elde edilmi tir. Buna ilaveten, çalı ılan ala ımların entalpi ve öz ısı de erleri de hesaplanmı tır. Deneysel çalı malar sonucunda elde edilen bulgular, literatürdeki benzer deneysel çalı malarla kar ıla tırılmı tır.

4.1. Deneysel Sonuçlar

4.1.1. Mikroyapıların Gözlenmesi

Kontrollü katıla tırma fırınında, sabit sıcaklık gradyentinde ve farklı katıla tırma hızlarında üretilen her bir numunenin metalografik süreçlerden geçirildikten sonra farklı büyütmelerde *SEM* foto rafları çekilmi tir ve bunlar, elde edilen ala ımların mikroyapılarının ve olu an fazların net bir biçimde belirlenmesi için kullanılmı tır. Bu kapsamda, sabit sıcaklık gradyentinde farklı katıla tırma hızlarında kontrollü katıla tırılmı olan Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala ımlarının *SEM* mikroskobuyla çekilen mikroyapı foto raflarından bazıları ekil 4.1-5'te verilmi tir.



ekil 4.1 Do rusal katıla tırılmı Al-12,6Si-2Cu ala ımının sabit sıcaklık gradyenti (G=7,78 K/mm) ve farklı katıla tırma hızlarında olu an mikroyapılarının enine kesitlerinden alınan SEM foto rafları. a) V= 8,25 μ m/s, b) V= 41,64 μ m/s, c) V= 165,4 μ m/s.



ekil 4.2. Do rusal katıla tırılmı Al-12,6Si-2Co ala ımının sabit sıcaklık gradyenti (G=7,59 K/mm) ve farklı katıla tırma hızlarında olu an mikroyapılarının enine kesitlerinden alınan SEM foto rafları. a)V= 8,35 μm/s, b)V= 41,6 μm/s, c)V=166,3 μm/s.



ekil 4.3. Do rusal katıla tırılmı Al-12,6Si-2Ni ala ımının sabit sıcaklık gradyenti (G=7,73 K/mm) farklı katıla tırma hızlarında olu an mikroyapılarının enine kesitlerinden alınan SEM foto rafları.
a) V= 8,32 μm/s, b) V= 41,43 μm/s, c) V= 165,4 μm/s.

93



ekil 4.4. Do rusal katıla tırılmı Al-12,6Si-2Sb ala ımının sabit sıcaklık gradyenti (G=8,04 K/mm) ve farklı katıla tırma hızlarında olu an mikroyapılarının enine kesitlerinden alınan SEM foto rafları.
a) V= 8,33 μm/s, b) V= 41,85 μm/s, c) V= 165,45 μm/s.



ekil 4.5. Do rusal katıla tırılmı Al-12,6Si-2Bi ala ımının sabit sıcaklık gradyenti (G=9,20 K/mm) ve farklı katıla tırma hızlarında olu an mikroyapılarının enine kesitlerinden alınan SEM foto rafları,
a) V= 8,35 μm/s, b) V= 41,5 μm/s, c) V= 165,5 μm/s.

4.1.2. Fazların Kimyasal Bile imlerinin Belirlenmesi

Her bir ala ım sistemine ait numunelerden *SEM* foto rafları çekildikten sonra bu foto raflarda belirginle en her bir fazın kimyasal bile im analizleri (*EDX*) yapılmı tır. Her bir sistem için yapılan katıla tırma deneyleri neticesinde bazı fazlar birbirinden ayrı mı tır. ncelenen ala ımda belirginle en her bir fazın nokta bile im analizleri yapılmı tır. ncelenen faz diyagramları, literatürdeki benzer çalı malar ve bu tez çalı ması kapsamında yapılan analizlere göre u ekilde de erlendirilmi tir:

ekil 4.1'de verilen mikroyapı foto raflarında Al-12,6Si-2Cu ala ımı için ana (matrix) Al () fazı üzerinde gri fleyk (flake) Si fazı ve Al₂Cu intermetalik fazı olmak üzere üç farklı fazın olu tu u gözlenmi tir. Yapılan *EDX* analiz sonuçları ekil 4.6'da gösterildi i gibi bu fazların,

- Ana (matrix) fazın Al () fazı,
- Gri fleyk (flake) fazın Si fazı,
- Çubuk fazın Al₂Cu intermetalik fazı

oldu u belirlenmi tir.

ekil 4.2'de verilen mikroyapı foto raflarından Al-12,6Si-2Co ala ımının kontrollü katıla tırılması neticesinde ana Al () fazı üzerinde gri fleyk Si fazı ve beyaz levhasal Co_2Al_9 intermetalik fazın olu tu u gözlenmi tir. Yapılan *EDX* analiz sonuçları ekil 4.7'de gösterildi i gibi bu fazların,

- Ana fazın Al () fazı,
- Gri fleyk fazın Si fazı,
- Beyaz fleyk fazın Co₂Al₉ intermetalik fazı

oldu u belirlenmi tir.

ekil 4.3'de verilen mikroyapı foto raflarından Al-12,6Si-2Ni ala ımının kontrollü katıla tırılması neticesinde ana Al () fazı üzerinde gri fleyk Si fazı ve beyaz fleyk Al₃Ni intermetalik fazı olmak üzere üç farklı fazın olu tu u gözlenmi tir. Yapılan *EDX* analiz sonuçları ekil 4.8'de gösterildi i gibi bu fazların,

- Ana fazın Al () fazı,
- Gri fleyk fazın Si fazı ,
- Beyaz fleyk fazın Al₃Ni intermetalik fazı

oldu u belirlenmi tir.

ekil 4.4'de verilen mikroyapı foto raflarında ise Al-12,6Si-2Sb ala ımının kontrollü katıla tırılması neticesinde ana Al () fazı üzerinde gri fleyk Si fazı olmak üzere iki farklı fazın olu tu u gözlenmi tir. Sb fazının Al içerisinde veya Si içerisinde çözündü ü anla ılmı tır. Yapılan *EDX* analiz sonuçlarının ekil 4.9'da gösterildi i gibi fazların,

- Ana fazın Al () fazı,
- Gri fleyk fazın Si fazı,

oldu u belirlenmi tir.

ekil 4.5'de verilen mikroyapı foto raflarından Al-12,6Si-2Bi ala ımının kontrollü katıla tırılması neticesinde ana Al () fazı üzerinde gri fleyk Si fazı ve beyaz fleyk AlBi intermetalik fazı olmak üzere üç farklı fazın olu tu u gözlenmi tir. Yapılan *EDX* analiz sonuçlarının ekil 4.10'da gösterildi i gibi bu fazların,

- Ana fazın Al () fazı,
- Gri fleyk fazın Si fazı,
- Beyaz fleyk fazın AlBi intermetalik fazı

oldu u belirlenmi tir.

EDX analizlerinden (ekil 4.6-10) görüldü ü gibi, Al-Si ötektik ala ımına katkılanan Cu, Co, Ni, Sb ve Bi elementlerin ala ımın mikroyapısını etkiledi i görülmektedir. Al-Si ötekti ine Cu katkılandı ında, levhasal Si fazının yanı sıra Al₂Cu intermetalik fazın; Co katkılandı ında, Co₂Al₉; Ni katkılandı ında, Al₃Ni ve Bi katkılandı ında AlBi intermetalik fazın olu tu u, Sb katkılandı ında ise katkılanan Sb elementinin Al ve Si fazları içinde çözündü ü gözlenmi tir. Olu an intermetalik fazını düzenli bir yapı olmadı ı, katıla tırma hızı arttıkça küçüldü ü ve belirginli ini kaybetti i görülmektedir.



ekil 4.6. Al-Si-Cu ala ımının kimyasal bile im analizi (EDX).



ekil 4.7. Al-Si-Co ala ımının kimyasal bile im analizi (EDX).



ekil 4.8. Al-Si-Ni ala ımının kimyasal bile im analizi (EDX).



ekil 4.9. Al-Si-Sb ala ımının kimyasal bile im analizi (*EDX*).



ekil 4.10. Al-Si-Bi ala ımının kimyasal bile im analizi (EDX).

4.1.3. Mikroyapıların Ölçülmesi

Üçlü ve daha fazla bile ene sahip ala ımlarda mikroyapılar Γ , S ve X fazlarından olu maktadır. Fakat bazı durumlarda, iki-üç intermetalik faz da olu abildi i görülmektedir. Ayrıca, ala ımın katıla tırılması neticesinde fleyksel büyümenin yanı sıra lifli veya çubuksal yapılarda olu abilmektedir [154]. Fleykler arası mesafe }, ekil 4.11'de verildi i gibi en yakın $\Gamma > \Gamma$, S>S veya X>X fazlarının merkezleri arasındaki uzaklıktır. Ba ka bir ifadeyle bu mesafe }, Γ , S11ve X lfazlarının toplam geni li idir. Fakat katıla tırma neticesinde fazların dizilim periyodu her zaman sıralı düzenli olmayabilir. Bu nedenle, düzenli simetriye sahip olmayan mikroyapılarda, fazlar arası mesafe olarak sadece Γ , S ve X fazları arasındaki mesafeler (} $_{\Gamma}$, }_s, }_x) ölçülebilmektedir.



ekil 4.11. Fazlar arası mesafelerin gösterimi (boyuna kesit).

Fazlar arası mesafe ölçümlerinin daha hassas yapılabilmesi amacıyla ala ım sistemlerine ait mikroyapıların foto rafları SEM mikroskobu ile çekildi. Numunelerin mikroyapılarının çekildi i SEM foto raflarının büyütme çarpanı bilindi inden, ölçülen

mikroyapı de erleri ile çarpılarak gerçek fazlar arası mesafe de erleri tespit edildi. Fazlar arası mesafe ölçümlerinde her bir numunenin enine kesitinden ölçümler alındı. Ayrıca, sonuçların güvenirlili ini daha da artırmak amacıyla farklı katıla tıma parametrelerinde üretilen herbir numune üzerinden çok sayıda (yakla ık 30) ölçüm alınarak ortalama de erler hesaplandı. Fazlar arası mesafelerin ölçümünde ekil 4.12'de gösterildi i gibi kesi im (intercept) metodu [155] kullanıldı. Fazlar arası mesafeler,

$$\}_{E} = \frac{X}{N_{L} - 1} \tag{4.1}$$

ifadesi ile hesaplandı. Burada *X*, fleyklerin toplam geni li i, N_L ise toplam fleyk sayısıdır. Bu tez çalı masında, her bir ala ım sistemi için gözlenen intermetalik fazların katıla tırma hızı arttıkça, fazların belirginli inin kaybolması nedeni ile sadece fleyk Si fazları arasındaki mesafe ölçülmü tür. Ölçülen fazlar arası (_{Si}) mesafeler Tablo 4.1'de verilmi tir.



ekil 4.12. Ala ımlarda fleykler arası mesafelerin ölçümü, (a) Geni bölge görüntüsü (enine kesit), (b) Dar bölge görüntüsü (enine kesit).

Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala ım sistemlerinin sabit sıcaklık gradyentinde, artan katıla tırma hızının mikroyapıya etkisinin grafi i ekil 4.13'de verilmektedir. Tablo 4.1'den ve ekil 4.13'den de görüldü ü gibi, Al-Si ötekti ine Cu katkılandı ında,

fleykler arası mesafe de erlerinin 10,80 μ m'den 3,04 μ m de erine; Co katkılandı ında, 6,14 μ m'den 1,82 μ m de erine azaldı 1; Ni katkılandı ında, fleykler arası mesafenin yakla 1k 3 kat; Sb katkılandı ında, yakla 1k 3,5 kat azaldı 1, Bi katkılandı ında ise 9,88 μ m'den 2,83 μ m de erine azaldı 1 görülmektedir.

Tablo 4.1 Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala 1m sistemlerine ait farklı
katıla tırma hızlarında büyütülen numunelerin fleykler arası mesafeleri,
mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel özdirenç de erleri.

Ala ım	Katıla Parame	tırma etreleri	Flevkler	Mikrosertlik	Cekme-	Elektriksel Özdirenc
(% a .)	G	V	Arası	HV	Dayanım	$\dots \mathbf{x10^{-5}}$
	(K / mm)	(~m/s)	l(μm)	(kg/iiiii)	1 (MPa)	(f1 mm)
		8,25	10,80	84,6	98,5	6,07
		16,57	8,50	88,2	111,5	6,30
Al-12,6Si-2Cu	7,78	41,64	6,45	97,15	132,9	6,60
		83,34	4,49	103,3	144,2	6,79
		165,40	3,04	113,8	158,4	7,02
		8,35	6,14	73,15	109,80	6,50
		16,57	5,51	79,45	118,03	6,78
A1 12 68: 20 a	7.50	41,63	3,73	85,37	139,50	7,03
AI-12,051-2C0	7,39	82,31	2,83	88,80	157,80	7,32
		166,30	1,82	94,75	194,20	7,55
		8,32	8,26	66,25	87,40	6,79
		16,27	6,46	70,55	94,70	7,07
Al-12.6Si-2Ni	7.73	41,43	4,25	75,71	104,10	7,52
	,,,,,	82,35	3,07	79,10	125,80	7,75
		165,45	2,72	83,03	142,70	8,14
		8,33	9,12	60,22	73,60	6,96
		16,23	7,24	63,30	80,20	7,35
A1-12 6Si-2Sh	8 04	41,85	4,78	67,04	86,47	7,75
AI-12,051-250	0,04	82,32	3,42	69,80	102,10	8,20
		165,45	2,57	72,02	116,78	8,56
		8,35	9,88	63,80	94,59	7,20
		16,63	7,65	67,60	105,70	7,68
A1 12 68; 2D;	0.20	41,55	5,32	71,80	122,25	8,27
AI-12,081-2B1	9,20	82,12	3,87	73,50	135,50	8,58
		165,54	2,83	76,11	150,48	8,95



ekil 4.13. Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri için sabit sıcaklık gradyentinde fleykler arası mesafelerin katıla tırma hızı ile de i imi

Tablo 4.2. Ala ımların katıla tırma deneylerinden elde edilen veriler ve ba ıntıları.

Ala 1m (% a .)	Erime Noktası (°C)	Sıcaklık Gradyenti (K/mm)	Katıla tırma Hız Aralı 1 (~m/s)	Fleykler Arası Mesafeler 1(µm)	Katıla tırma için Elde Edilen Ba ıntılar
Al-12,6Si-2Cu	584,53	7,78	8,25-165,41	10,80-3,04	=27,02V ^{-0,41}
Al-12,6Si-2Co	594,25	7,59	8,35-166,31	6,14-1,82	=16,02V ^{-0,40}
Al-12,6Si-2Ni	583,68	7,73	8,32-165,45	8,26-2,72	=21,05V ^{-0,43}
Al-12,6Si-2Sb	593,37	8,04	8,33-165,45	9,12-2,57	=23,69V ^{-0,43}
Al-12,6Si-2Bi	597,11	9,20	8,35-165,54	9,88-2,83	=24,67V ^{-0,42}

*Korelasyon katsayıları Ek-3'de verilmi tir.

Tablo 4.2'den görüldü ü gibi, Al-Si ötektik ala ımına katkılalan Cu, Co, Ni, Sb ve Bi elementleri için mikroyapıya göre katıla tırma hızı sırasıyla 0,41, 0,42, 0,43, 0,43 ve

0,40 üstel de erleri ile azalmaktadır. Fleykler arası mesafenin en büyük de eri (10,80-3,04 μ m) Cu katkılanan Al-Si ötekti inde görülürken, en küçük de eri (6,14-1,82 μ m) ise Co katkılanan Al-Si ötekti inde gözlenmi tir.

4.1.4. Mikrosertlik De erlerinin Ölçülmesi

Kontrollü olarak do rusal katıla tırılan numunelerin mikroyapı ölçümlerinden sonra, 3. Bölüm'de anlatıldı 1 gibi Vickers sertlik ölçme yöntemi ile mikrosertlik de erlerinin ölçümüne geçilmi tir. Her bir numunenin, mikrosertlik test cihazında boyuna kesitteki katı-sıvı arayüzeyinin katı bölgelerinden kg/mm² cinsinden ölçülmü tür. Ölçülen mikrosertlik de erleri, de i en katıla tırma hızı ve mikroyapı de erlerine göre ayrı ayrı incelenmi tir. statistiksel güvenirlili i artırmak için, her bir kesit üzerinde en az 10 ölçüm alınarak ortalama de erleri ekil 4.14 ve Tablo 4.1'de verilmi tir.



ekil 4.14. Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri için mikrosertlik de erlerinin katıla tırma hızı ile de i imi.

ekil 4.14 ve Tablo 4.1'den görüldü ü gibi artan katıla tırma hızına ba lı olarak Al-Si ötektik ala ımına Cu katkılandı ında mikrosertlik de erleri 84,6 kg/mm²'den 113,8

kg/mm ² d	e erine,	Ni k	katkılandı	ında	66,25	kg/mm ²	'den	83,03	kg/mm ²	de	erine,	Sb
katkılandı	1nda 60,	,22 k	g/mm ² 'de	n 72,0	02 kg/r	nm^2 de	erine	artmak	tadır.			

Ala 1m (% a .)	Katıla tırma Hız Aralı ı (~m/s)	Fleykler Arası Mesafeler 1(µm)	Mikrosertlik HV (kg/mm ²)	Mikrosertlik için Elde Edilen Ba ıntılar
Al-12,6Si-2Cu	8,25-165,41	10,80-3,04	84,6-113,8	HV= $62,31V^{0,09}$ HV= 148,93 $^{-0,24}$
Al-12,6Si-2Co	8,35-166,31	6,14-1,82	73,15-94,75	$\begin{array}{l} \text{HV}{=}62,17\text{V}^{0,08} \\ \text{HV}{=}\ 106,60 \end{array} {}^{-0,18} \end{array}$
Al-12,6Si-2Ni	8,32-165,45	8,26-2,72	66,25-83,03	$HV=56,94V^{0.07}$ $HV=93,94^{-0.16}$
Al-12,6Si-2Sb	8,33-165,45	9,12-2,57	60,22-72,02	$HV=53,36V^{0,05}$ $HV=82,19^{-0,13}$
Al-12,6Si-2Bi	8,35-165,54	9,88-2,83	63,80-76,11	$HV=53,54V^{0,06}$ $HV=89,35^{-0,15}$

Tablo 4.3. Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala 1m sistemlerine ait farklı katıla tırma hızı ve fleykler arası mesafelerinin mikrosertlik de erleri arasındaki ba 1ntılar.

*Korelasyon katsayıları Ek-3'de verilmi tir.

Tablo 4.3'de kontrollü katıla tırılan Al-Si-X ala ımlarında mikrosertlik ile katıla tırma hızı ve mikroyapı arasındaki de i im ba ıntıları verilmektedir. Tablo 4.3 ve ekil 4.14 incelendi inde, bütün ala ım sistemleri için artan katıla tırma hızına ba lı olarak mikrosertlik de erlerinin de arttı 1 görülmektedir.

Al-Si ötektik ala ımına ayrı ayrı katkılanan Cu, Co, Ni, Sb ve Bi elementleri ile olu turulan ala ım sistemleri için mikrosertlik, katıla tırma hızının sırasıyla 0,09, 0,08, 0,07, 0,05 ve 0,06 üstel de eri ile artmaktadır. Al-Si ötektik ala ımına Cu katkılandı ında, en yüksek mikrosertlik de eri (84,6-113,8 kg/mm²) ve en yüksek üstel de er (0,09), Sb katkılandı ında ise en dü ük mikrosertlik de eri (60,22-72,02 kg/mm²) ve en küçük üstel de er (0,05) elde edilmi tir.

Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala ım sistemleri için mikrosertli in mikroyapı parametresi ile de i imi ekil 4.15'te verilmektedir. ekil 4.15 incelendi inde, bütün ala ım sistemleri için fleykler arası mesafelerin artması ile

mikrosertlik de erlerinin azaldı 1 görülmektedir. Tablo 4.3 ve ekil 4.14'de görüldü ü gibi katkılanan Cu, Co, Ni, Bi ve Sb elementleri için mikrosertlik, fleykler arası mesafenin sırasıyla 0,24, 0,18, 0,16, 0,15 ve 0,13 üstel de eri ile azalmaktadır. Al-Si ötektik ala ımına Cu katkılandı ında, en yüksek üstel de er (0,24), Sb katkılandı ında ise en dü ük üstel de er (0,13) elde edilmi tir.



ekil 4.15. Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri için mikrosertlik de erlerinin fleykler arası mesafeleri ile de i imi.

ekil 4.16'da Al-Si ötekti ine yapılan katkılama elementleri (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) ile olu turulan ala ımların döküm fazındaki mikrosertlik de erleri verilmektedir. ekil 4.16'dan görüldü ü gibi Al-Si ötektik ala ımına yapılan katkılama elementi de i tikçe mikrosertlik de eri de de i mektedir. En yüksek mikrosertlik de eri Cu katkılandı ında, en dü ük mikrosertlik de eri ise Sb katkılandı ında ölçülmü tür. Bu durum Al-Si ötektik ala ımına Cu katkılandı ında, olu an intermetalik Al₂Cu fazından kaynaklanabilir. Sb katkılanan Al-Si ötekti ine katkılanan Sb, ana Al fazı ve levhasal Si fazı içerisinde çözünmü tür ve ayrı bir faz olu turmamı tır. Bu durum Al-Si ötekti inin mikrosertlik de erinin (74,2 kg/mm²) [102] çok fazla bir de i iklik göstermemesine sebep olmu tur.



ekil 4.16. Döküm fazındaki Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala ım sistemleri için mikrosertlik de erleri.

4.1.5. Çekme-Dayanımı De erlerinin Ölçülmesi

Kontrollü katıla tırılan numunelerin mikroyapı ölçümleri ve mikrosertlik de erlerinin belirlenmesinden sonra çekme-dayanımı testine geçilmi tir. Her bir numune en az 50 mm uzunlu unda kesilerek, çekme-dayanımı () test cihazının çeneleri arasında sıkı tırıldıktan sonra, 10 mm/dak'lık hızlarda çekme yapılarak kopması sa lanmı ve çekme-dayanımı de erleri, MPa cinsinden ölçülmü tür. Ölçülen çekme-dayanımı de erleri de i en katıla tırma hızı ve fleykler arası mesafe (}) de erlerine göre ayrı ayrı incelenmi tir. ekil 4.17'de Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi (a .)) ala ım sistemlerine ait çekme-dayanımı de erlerinin katıla tırma hızına göre de i imi verilmektedir.

ekil 4.17'den Al-Si ötekti ine yapılan katkılama elementleri ile olu turulan ala ımlarda, katıla tırma hızının çekme-dayanımı de erlerinde de i ime yol açtı ı görülmektedir ve bütün ala ım sistemlerinde, katıla tırma hızı arttıkça çekme-dayanımı de erleri artmaktadır. Al-Si ötekti ine yapılan katkılama elementleri ile ayrı ayrı olu turulan ala ım sistemleri için artan katıla tırma hızına göre çekme-dayanımı de erleri, Cu katkılandı ında 98,5 MPa'dan 158,4 MPa de erine, Co katkılandı ında 109,8 MPa'dan 194,20 MPa de erine, Ni katkılandı ında 87,40 MPa'dan 142,70 MPa de erine, Bi katkılandı ında 94,59 MPa'dan 76,11 MPa de erine ve Sb katkılandı ında 73,60 MPa'dan 116,78 MPa de erine arttı ı gözlenmi tir. ekil 4.17'den görüldü ü gibi katıla tırılan her bir ala ım için yakla ık 8,30 µm/s'de en küçük çekme-dayanımı de eri Sb katkılandı ında 73,60 MPa, en büyük de er Co katkılandı ında 109,8 MPa olarak ölçülmü tür.



ekil 4.17. Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri içini çekme-dayanımı de erlerinin katıla tırma hızı ile de i imi

Tablo 4.4'de ala ım sistemlerinin çekme-dayanımı de erleri ile mikroyapı ve katıla tırma hızı arasındaki ba ıntılar verilmektedir.

Ayrıca Al-Si ötekti ine Cu ve Co katkılandı ında olu turulan ala ımların çekmedayanımı de erleri katıla tırma hızının 0,18 üstel de eri ile, Ni katkılandı ında 0,16 üstel de eri ile, Sb ve Bi katkılandı ında ise 0,15 üstel de eri ile arttı 1 Tablo 4.4'den de görülmektedir. Tablo 4.4. Al-12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemlerine ait farklı katıla tırma hızı ve fleykler arası mesafelerinin çekme-dayanımı de erleri arasındaki ba 1ntılar.

Ala 1m (% a .)	Katıla tırma Hız Aralı ı (~m/s)	Fleykler Arası Mesafeler 1(µm)	Çekme-Dayanımı † (MPa)	Çekme-Dayanım için Elde Edilen Ba ıntılar
Al-12,6Si-2Cu	8,25-165,41	10,80-3,04	98,5-158,4	$=71,53(V)^{0,15}$ $=262,14()^{-0,39}$
Al-12,6Si-2Co	8,35-166,31	6,14-1,82	109,8-194,20	$=71,19(V)^{0,18}$ =238,85() ^{-0,37}
Al-12,6Si-2Ni	8,32-165,45	8,26-2,72	87,40-142,70	$=59,93(V)^{0.16}$ =192,81() ^{-0.37}
Al-12,6Si-2Sb	8,33-165,45	9,12-2,57	73,60-116,78	$=52,20(V)^{0,15}$ =156,56() ^{-0,34}
Al-12,6Si-2Bi	8,35-165,54	9,88-2,83	94,59-150,48	$=68,22(V)^{0,15}$ =217,11() ^{-0,37}

*Korelasyon katsayıları Ek-3'de verilmi tir.



ekil 4.18. Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri için çekme-dayanımı de erlerinin fleykler arası mesafeler ile de i imi.

ekil 4.18'de Al-Si-x ala ım sistemlerinde çekme-dayanımı de erlerinin fleykler arası mesafe ile de i iminin grafi i verilmektedir. ekil 4.18'den ve Tablo 4.4'den görüldü ü gibi bütün ala ım sistemleri için 'nın artması ile de erleri azalmaktadır. Cu katkılanarak olu turulan ala ım için de erleri 'nın 0,39 üstel de eri ile, Co ve Bi katkılandı ında 0,37, Ni katkılandı ında 0,38, Sb katkılandı ında 0,34 üstel de eri ile azalmaktadır. Al-Si ötektik ala ımına yapılan katkılama elementleri açısından incelendi inde Cu elementi katkılandı ında en yüksek üstel de er (0,39) elde edilirken, Sb katkılandı ında ise en dü ük üstel de er (0,34) bulunmu tur.

4.1.6. Elektriksel Özdirenç De erlerinin Ölçülmesi

Kontrollü katıla tırılan numunelerden 20 mm uzunlu unda kesilerek 3. Bölüm'de anlatıldı 1 gibi dört nokta kontak metodu ile elektriksel özdirenç de erleri ölçülmü tür. Her bir numune, oda sıcaklı ında kül fırını içine yerle tirilip dört gümü telin numuneye tamamen temas etti i belirlendikten sonra elektriksel özdirenç de erleri m cinsinden ölçülmü tür. statistiksel güvenirlili i artırmak için her bir numune üzerinde en az 100 ölçüm alınarak ortalama de erleri Tablo 4.1, ekil 4.19 ve ekil 4.20'de verilmi tir.



ekil 4.19. Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri için elektriksel özdirenç de erlerinin katıla tırma hızı ile de i imi

ekil 4.19'da ala ım sistemlerinin katıla tırma hızına ba lı olarak elektriksel özdirenç de erlerinin () de i imi verilmektedir. Katıla tırma hızı arttıkça ala ım sistemlerinde de erlerinin de arttı ı görülmektedir. Al-Si ötektik ala ımına Cu katkılandı ında de erinin 6,07x10⁻⁸ Ω m'den 7,02x10⁻⁸ Ω m'ye, Co katkılandı ında 6,50x10⁻⁸ Ω m'den 7,55x10⁻⁸ Ω m'ye, Ni katkılandı ında 6,79x10⁻⁸ Ω m'den 8,14x10⁻⁸ Ω m'ye, Sb katkılandı ında de erinin 6,96x10⁻⁸ Ω m'den 8,56x10⁻⁸ Ω m'ye ve Bi katkılandı ında 7,20x10⁻⁸ Ω m'den 8,95x10⁻⁸ Ω m'ye arttı ı gözlenmi tir. Saf Bi elementinin elektriksel özdirenç de eri (129x10⁻⁸ Ω m) [88] daha büyük oldu u için Al-Si ötekti ine Bi katkılandı ında en yüksek elektriksel özdirenç de erinin (7,20-8,95x10⁻⁸ Ω m) daha büyük, saf Cu elementinin elektriksel özdirenç de eri (0,017x10⁻⁸ Ω m) [153] daha dü ük oldu undan dolayı Cu katkılanarak olu turulan Al-Si-Cu ala ımının elektriksel özdirenç de erinin (6,02-7,02x10⁻⁸ Ω m) daha dü ük oldu u dü ünülmektedir.

Tablo 4.5'den de görüldü ü gibi elektriksel özdirenç de erlerine göre katıla tırma hızı Cu ve Co katkılandı ında 0,04 üstel de eri ile, Ni katkılandı ında 0,05, Sb katkılandı ında 0,06, Bi katkılandı ında 0,07 üstel de eri ile artmaktadır.



ekil 4.20. Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri için elektriksel özdirenç de erlerinin fleykler arası mesafe ile de i imi.

ekil 4.20'de ala ım sistemlerinin elektriksel özdirenç de erleri ile fleykler arası mesafe de erlerinin de i im grafi i verilmektedir. ekil 4.20'den ve Tablo 4.5'ten de görüldü ü gibi bütün ala ım sistemleri için de erlerinin artması ile de erleri azalmaktadır. Al-Si ötektik ala ımına Bi katkılandı ında de erleri, 'nın 0,16 üstel de eri ile, Sb katkılandı ında 0,15, Ni katkılandı ında 0,14, Cu ve Co katkılandı ında ise 0,13 üstel de erleri ile azalmaktadır.

Hazırlanan ala ım sistemlerinde sıcaklı a ba lı de erlerinin de i imi ekil 4.21'de verilmektedir. Bütün numunelerin elektriksel özdirenç de erleri oda sıcaklı ından (25^oC) 220^oC'ye kadar ölçülmü tür. ekilden de görüldü ü gibi bütün ala ım sistemleri için sıcaklı ın artması ile elektriksel özdirenç de erleri artmaktadır. Bu tez çalı masında Al-Si ötekti ine katkı yapılarak elde edilen ala ım sistemlerine göre, Bi katkılandı ında elde edilen Al-Si-Bi ala ımının, daha yüksek elektriksel özdirenç de erine, Cu katkılanarak olu turulan Al-Si-Cu ala ımının ise daha dü ük elektriksel özdirenç de erine şahip oldu u görülmektedir.



ekil 4.21. Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemleri için elektriksel özdirenç de erlerinin sıcaklık ile de i imi.

Ala ım (% a .)	Katıla tırma Hız Aralı ı (~m/s)	Fleykler Arası Mesafeler 1(µm)	Elektriksel Özdirenç × 10 ⁻⁸ (m)	Elektriksel Özdirenç için Elde Edilen Ba ıntılar
Al-12,6Si-2Cu	8,25-165,41	10,80-3,04	6,07-7,02	$=5,51 \times 10^{-8} (V)^{0,04}$ $=9,10 \times 10^{-8} (\lambda)^{-0,13}$
Al-12,6Si-2Co	8,35-166,31	6,14-1,82	6,50-7,55	$=5,67 \times 10^{-8} (V)^{0.04}$ $=8,81 \times 10^{-8} (\lambda)^{-0.13}$
Al-12,6Si-2Ni	8,32-165,45	8,26-2,72	6,79-8,14	=5,87x10 ⁻⁸ (V) ^{0,05} =9,26x10 ⁻⁸ (λ) ^{-0,14}
Al-12,6Si-2Sb	8,33-165,45	9,12-2,57	6,96-8,56	$=6.03 \times 10^{-8} (V)^{0.06}$ $=9.89 \times 10^{-8} (\lambda)^{-0.15}$
Al-12,6Si-2Bi	8,35-165,54	9,88-2,83	7,20-8,95	$=6,36 \times 10^{-8} (V)^{0.07}$ $=10,59 \times 10^{-8} (\lambda)^{-0.16}$

Tablo 4.5. Al-12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemlerine ait katıla tırma hızı ve fleykler arası mesafelerinin elektriksel özdirenç de erleri arasındaki ba 1ntılar.

*Korelasyon katsayıları Ek-3'de verilmi tir.



ekil 4.22. Döküm yapılmı Al-Si-X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala ım sistemleri için elektriksel özdirenç de erleri

ekil 4.22'de Al-Si ötektik ala ımına yapılan katkılama elementleri (Cu, Co, Ni, Sb, Bi) için döküm fazındaki ala ımların ölçülen elektriksel özdirenç de erleri verilmektedir. ekil 4.22'den de görüldü ü gibi katkılama elementi de i tikçe Al-Si-X ala ımlarının da elektriksel özdirenç de eri de i mektedir. En yüksek elektriksel özdirenç de eri (12,1x10⁻⁸ Ω m) Bi katkılandı ında, en dü ük elektriksel özdirenç de eri ise (4,7x10⁻⁸ Ω m) Cu katkılandı ında ölçülmü tür.

4.1.7. Erime Sıcaklı ı, Entalpi ve Öz Isı De erlerinin Ölçülmesi

Bu tez çalı masında üretilen ala ımların erime sıcaklı $1 (T_e)$, entalpi de i imleri (U*H*) ve öz ısı de i imleri (U*C_p*) 3. Bölüm'de anlatıldı 1 gibi diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanılarak ölçülmü tür. Al-12,6Si-2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala ım sistemlerinin termal özellikleri 10 K/dak. ısıtma hızında 300-920 K sıcaklık aralı ında incelenmi tir. Elde edilen sıcaklık-ısı akı ı e rileri ekil 4.23'de, elde edilen sonuçlar ise Tablo 4.6'da verilmektedir.



ekil 4.23. Al-Si ötekti ine katkılanan elementlerin 1sı akı 1-sıcaklık e rilerine etkisi

ekil 4.23 ve Tablo 4.6'dan görüldü ü gibi, Al-Si ötekti ine Cu katkılandı ında erime sıcaklı 1 (T_e) 857,53 K, entalpi de i imi (Δ H) 260,84 J/g ve öz ısı de eri (Δ C_P) 0,304 J/gK, Co katkılandı ında T_e =867,25 K, Δ H=235,61 J/g ve Δ C_P=0,271 J/gK, Ni katkılandı ında T_e=856,68 K, Δ H=209,31 J/g ve Δ C_P=0,244 J/gK, Bi katkılandı ında T_e=870,11 K, Δ H=248,05 J/g ve Δ C_P=0,285 J/gK olarak tespit edilmi tir.

Tablo 4.6. Al-%12,6Si-%2X (X=Cu, Co, Ni, Sb, Bi) ala 1m sistemlerine ait 1s1 ak1 1sıcaklık e rilerinden elde edilen veriler.

Ala ım (%a .)	Tpik (K)	Alan (mJ)	H (J/g)	$C_{p}\left(J/gK\right)$	-
A1 120: [120]	021 (1		469.2	0.562	_
AI-1251 [130]	831,01	-	468,2	0,563	
Al-12,6Si-2Cu	857,53	691,14	260,84	0,304	
Al-12,6Si-2Co	867,25	2704,68	235,61	0,271	
Al-12,6Si-2Ni	856,68	1240,59	209,31	0,244	
Al-12,6Si-2Sb	866,37	2236,01	282,60	0,326	
Al-12,6Si-2Bi	870,11	3029,24	248,05	0,285	

Deneysel sonuçlardan, Al-Si ötektik ala ımına yapılan katkı elementlerinin (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) ala ımın erime sıcaklı 1, entalpi ve öz ısı de erlerin de de i ikli e yol açtı 1 görülmektedir. Al-Si ötekti inin erime sıcaklı ının (831,61K) katkılanan elemente ba lı olarak artırdı 1 gözlenirken, entalpi (468,2 J/g) ve öz ısı (0,563 J/gK) de erlerinin azaldı 1 gözlenmi tir. En yüksek entalpi ve öz ısı de erleri (282,60 J/g, 0,326 J/gK) Sb katkılandı ında, en dü ük entalpi ve öz ısı de eri (209,31 J/g, 0,244 J/gK) Ni katkılandı ın da ölçülmü tür.

4.2. Tartı ma

4.2.1. Katıla tırma Hızı ve Mikroyapının Fiziksel Özelliklere Etkisi

Bu çalı mada Al-Si ötekti ine Cu, Co, Ni, Sb ve Bi katkılanarak elde edilen üçlü ala ımların kontrollü katıla tırılması ile olu an mikroyapıların, katıla ma hızına ba lılı 1 0,40-0,43 üstel de erleri arasında de i mektedir. Tablo 4.7'den de görüldü ü

gibi bu çalı mada bulunan üstel de erler, Steinbach ve ark. [94] Al-7Si-Fe için 0,39, Gündüz ve ark. [89] Al-12,6Si için 0,46, Engin [46] Al-11,7Si-1Fe ve Al-12Si-5Ni-0,4Fe ala ımları için 0,38, Kaya ve ark. [109] Al-7Ni için 0,48 ve Al-1,1 Sb [141] için 0,47, Kaygısız ve ark. [97] Al-12,95Si-4,96Mg için 0,45 olarak buldukları üstel de erleri ile uyum içerisindedir.

Ala ım(%a .)	G	V (~m/s)	Ba ıntı	Kaynak
	(K/mm)			
Al-12,6Si-2Cu	7,787	8,25-165,41	$\lambda = 27,02 V^{-0,41}$	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Co	7,599	8,35-166,31	$\lambda = 16,02V^{-0,40}$	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Ni	7,735	8,32-165,45	$\lambda = 21,05 V^{-0,43}$	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Sb	8,041	8,33-165,45	$\lambda = 23,69 V^{-0,43}$	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Bi	9,202	8,35-165,54	$\lambda = 24,67V^{-0,42}$	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si		8,30 -498,70	$\lambda = 23,44 V^{-0,46}$	[5]
Al-12,6Si	7,8	8,3-498,7	$\lambda = 23,44 V^{-0,46}$	[89]
Al-12,7Si-0,2Sb	12,9	250		[92]
Al-13Si	7-14	10-2000	$\lambda_L = 55 V^{-0.52}$	[93]
Al-7Ni	4,2	8.3-489.5	$\lambda = 124, 2V^{-0,48}$	[109]
Al-7Si	3	15-180	$\lambda_a = 84, 1 V^{-0.63}$	[94]
Al-7Si-1Fe	3	15-180	$\lambda = 143, 4V^{-0,39}$	[94]
Al-7Si-1Mn	3	15-180	$\lambda_a = 84,5V^{-0,54}$	[94]
Al-6Si-4Cu	3	15-150	$\lambda_a = 246 V^{-0,24}$	[95]
Al-11,1Si-4,2Ni	5,82	6,60-243,33	$\lambda_{Si} = 12,58V^{-0,50}$	[96]
Al-12,95Si-4,96Mg	9,39	8,64-165,20	$\lambda_{Si}=29,32V^{-0,45}$	[97]
Al-7Si- 0.6Mg	3	15-150	$\lambda_E = 33,5V^{-0,50}$	[98]
Al-10,98Si-4,9Ni		1,39-6,95	$\lambda_a = 0,11 R^{-0,46}$	[99]
Al-11,7Si-1Fe	6,63	8,25-164,81	$\lambda_{Si}=12,13V^{-0,38}$	[46]
Al-12Si-5Ni-0,4Fe	6,43	8,25-164,81	$\lambda_{(Si)}=9,94V^{-0,38}$	[46]
Ti-43Al-3Si (at.%)	20	5-60	$\lambda = 650, 1V^{-0,44}$	[111]
Al-23,9Cu-1,2Co	5,66	8,3-166	$\lambda = 12,02 V^{-0,44}$	[127]
Al-1,1Sb	4,05	8,3-152	$\lambda = 1,17V^{-0,47}$	[141]

Tablo 4.7. Alüminyum esaslı ala ımlarda katıla tırma üzerine yapılan çalı malar ve elde edilen ba ıntılar.
Ancak bu çalı mada elde edilen katıla tırma hızına ili kin üstel de erler (0,40-0,43), literatürde yer alan benzer ala ım sistemleri için bulunan bazı deneysel sonuçlardan farklılık göstermektedir. Tablo 4.7'den görüldü ü gibi Hosch ve ark. [93] Al-13Si için 0,52, Steinbach ve ark. [94] Al-7Si-1Mn için 0,54, Steinbach ve ark. [98] Al-7Si-6Mn için 0,50 üstel de erleri bu çalı mada bulunan üstel de erlerinden nispeten büyük çıkmı tır. Di er taraftan Steinbach ve ark. [95] Al-6Si-4Cu için 0,24, Yılmazer [127] Al-13,6Cu-6Si için 0,21 üstel de erleri ise dü ük bulunmu tur. Üstel de erlerdeki bu farklılık, ala ımların bile en ve kompozisyonlarının, mikroyapıların, katıla tırma artlarının farklı olmasından ve deneysel hatalardan kaynaklanmı oldu u dü ünülmektedir. Tablo 4.7'de literatürde yer alan alüminyum esaslı ala ımlar üzerine yapılan bazı çalı malar ve elde edilen deneysel ba ıntılar verilmektedir.

Al esaslı ikili ve üçlü ala ımların mikrosertlik ölçümlerine ili kin literatürde yer alan bazı çalı malar ve deneysel ba ıntıları Tablo 4.8'de verilmektedir.

Bu çalı mada bulunan HV de erleri V'nin (0,05-0,09) üstel de erleri ile artmaktadır. Tablo 4.8'den görüldü ü gibi Al esaslı ala ımların üzerine literatürde yer alan çalı malardaki [46, 97, 102, 109, 125, 127, 141] üstel de erler (0,05-0,11) ile oldukça iyi uyum içerisindedir. Bununla birlikte Khan ve ark. [101], Al-12,7Si ve Al-14,6Si ala ımları için 0,12, Fan ve ark. [112] ve Ti-at.%46Al-at.%0,5W-at.%0,5Si ala ımları için 0,15, Engin [46] Al-12Si-5Ni-0,4Fe için 0,25 üstel de erleri bu çalı mada bulunan üstel de erlerden biraz büyüktür.

Tablo 4.9'da bazı ara tırmacıların çekme-dayanımı de erleri ile katıla tırma parametresi ve mikroyapı parametresi arasındaki ili ki ve ba ıntılar verilmi tir.

Tablo 4.9'dan görüldü ü gibi bu çalı mada, çekme-dayanımı de erleri katıla tırma hızının 0,15-0,18 üstel de erleri ile artmaktadır. Bu deneysel sonuçlar literatürde yer alan [46, 97, 125, 141] benzer ala ım sistemleri için bulunan üstel de erler ile (0,15-0,22) oldukça iyi uyum içindedir.

Ayrıca bu çalı mada çekme-dayanımı de erleri, mikroyapının 0,34-0,39 üstel de erleri ile de i mektedir. Tablo 4.9'dan görüldü ü gibi bu çalı madaki üstel de erler, Cante ve ark. [121] Al-1Ni, Al-3Ni ve Al-5Ni ala ımları için 0,50, Goulart [122] Al-5Si ve Al-9Si için 0,50 olarak bulunan üstel de erinden biraz dü ük çıkmı tır.

Ala ım(%a .)	Mikrosertlik	Referans
Al-12,6Si-2Cu	HV=134,12V ^{0,09}	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Co	$HV = 28,37 -0.24$ $HV = 110,06V^{0.08}$ $HV = 20,22 -0.18$	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Ni	HV = 30,22 $HV = 95,36V^{0,07}$ $HV = 31.01^{-0,16}$	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Sb	HV = 30,01 HV = 80,73V ^{0,05} HV = 32.08 ^{-0,13}	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Bi	$HV = 85,26V^{0,06}$ $HV = 31.52^{-0,15}$	[Bu çalı ma]
Al-12,7Si-0,2Sb	HV = 51,52 $HV = K^{-0,2}$	[92]
Al-1,1Sb	$HV = 19(V)^{0.08}$	[141]
Al-11,1Si-4,2Ni	$HV = 72,44(V)^{0,08}$	[125]
Al-23,9Cu-1,2Co	$HV = 184,07(V)^{0.05}$ $HV = 237,74()^{-0.10}$	[127]
Al-13,6Cu-6Si	HV = $83,18(V)^{0.05}$ HV = $53,34()^{-0.23}$	[127]
Al-3Ni	HV =104,1() ^{-0,5}	[108]
Al-5Ni	HV =52,3() ^{-0,5}	[108]
Al-7Ni	$HV = 114.8()^{-0.24}$ $HV = 66.1(V)^{0.11}$	[109]
Al-7,5Ni	HV =0,18 $(_{1})^{-0,24}$	[110]
Al-12,7Si Al-14,6Si	$\mathbf{HV} = \mathbf{KV}^{0,12}$	[101]
Al-12,6Si	$HV = 84,92(V)^{0.09}$ $HV = 25,35(_1)^{-0,16}$	[102]
Ti-46Al-0,5W-0,5Si (% at.)	$HV = 398,1(_1)^{-0,31}$ $HV = 794,7(V)^{0,15}$	[112]
Al-12,95Si-4,96Mg	$HV = 1,98(_{Si})^{-0.5}$ $HV = 119,9(V)^{0.07}$	[97]
Al-11,7Si-1Fe	HV =88,11($_{A15SiFe}$) ^{-0,08} HV =67,90(V) ^{0,07}	[46]
Al-12Si-5Ni-0,4Fe	HV = $101,69(_{Si})^{-0,17}$ HV = $50,75(V)^{0,25}$	[46]

Tablo 4.8. Mikrosertlik üzerine yapılan bazı çalı malar ve elde edilen ba ıntılar.

Ala ım(%a .)	Çekme-Dayanımı	Referans
Al-12,6Si-2Cu	$=71,53(V)^{0,15}$ =262.14() ^{-0,39}	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Co	$=71,19(V)^{0,18}$ =238.85() ^{-0,37}	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Ni	$=59,93(V)^{0,16}$ =192.81() ^{-0,37}	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Sb	$=52,20(V)^{0,15}$ =156,36() ^{-0,34}	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Bi	$=68,22(V)^{0.15}$ =217,11() ^{-0,37}	[Bu çalı ma]
Al-1Ni	$=200,2(1)^{-0,5}$ $=188,3(2)^{-0,5}$	[121]
Al-3Ni	$=325,6(_{1})^{-0,5}$ $=221,7(_{2})^{-0,5}$	[121]
Al-5Ni	$=468,5(_1)^{-0,5}$ =228.6(_2)^{-0,5}	[121]
Al-5Si	$=45(_{2})^{-0.5}$	[122]
Al-9Si	$=146(2)^{-0.5}$	[122]
Al-1,1Sb	$=0,276(V)^{0,15}$	[141]
Al-11,7Si-1Fe	$=301,07(_{Si})^{-0,37}$ =450,08(_{Al5SiFe})^{-0,39} =269,76(V)^{0,25}	[46]
Al-12Si-5Ni-0,4Fe	$=177,86(V)^{0,11}$ =336,67(si) ^{-0,28} =349,39(2A13Ni) ^{-0,31} =254,73(V) ^{0,25} 7,27() ^{-0,5}	[46]
Al-11,1Si-4,2Ni	$=7,37(S_{i})^{-1}$ =37,15 (V) ^{0,19}	[125]
Al-23,9Cu-1,2Co	=6,75 (V) ^{0,22}	[127]
Al-12,95Si-4,96Mg	=222,84(V) ^{0,20}	[97]

Tablo 4.9. Çekme-dayanımı üzerine yapılan bazı çalı malar ve elde edilen ba ıntılar.

Tablo 4.10'da literatürde yer alan bazı çalı maların elektriksel özdirenç de erleri ile katıla tırma parametresi ve mikroyapı parametresi arasındaki ili kileri ve ba ıntıları verilmi tir.

Ala ım	Elektriksel	Referans
	Özdirenç(x10 ⁻⁸)	
Al-12,6Si-2Cu	$=5,51 (V)^{0,04}$	[Bu çalı ma]
	$=9,10 (\lambda)^{-0,13}$	
Al-12,6Si-2Co	$=5,67 (V)^{0.04}$	[Bu çalı ma]
	$=8,81 (\lambda)^{-0.13}$	
Al-12,6Si-2Ni	$=5,87 (V)^{0,05}$	[Bu çalı ma]
	$=9,26 (\lambda)^{-0.14}$	
Al-12,6Si-2Sb	$=6,03 (V)^{0,06}$	[Bu çalı ma]
	$=9,89 (\lambda)^{-0.15}$	
Al-12,6Si-2Bi	$=6,36 (V)^{0,07}$	[Bu çalı ma]
	$=10,59 (\lambda)^{-0,16}$	
	$=0,0013 (V)^{0,07}$	[126]
Al-5,7Ni	$=0,047 (\lambda)^{-0,13}$	
	$=0,014(V)^{0,07}$	[109]
Al-7Ni	$=0,062(\lambda)^{-0,14}$	
Al-7,5Ni	$=0,091(\lambda)^{-0,09}$	[110]
Al-11,1Si-4,2Ni	$=4,57(V)^{0.08}$	[125]
Al-12,95Si-4,96Mg	$=32,31(V)^{0,13}$	[97]
	$=5,22(V)^{0,12}$	[46]
Al-11,7Si-1Fe	$=11.6(\lambda_{\rm Si})^{-0.32}$	
Al-12Si-5Ni-0,4Fe	$=5,06(V)^{0,12}$	[46]
	$=14.6 (\lambda_{\rm Si})^{-0.46}$	
Al-23,9Cu-1,2Co	$=0,086(V)^{0,09}$	[127]
Al-1,1Sb	$=0,061(V)^{0,12}$	[141]

Tablo 4.10. Elektriksel özdirenç üzerine yapılan bazı çalı malar ve elde edilen ba ıntılar.

Bu çalı madaki elektriksel özdirenç de erlerinin katıla tırma hızı ile de i imi Al-Si ötekti ine Cu ve Co katkılandı ında 0,04, Ni katkılandı ında 0,05, Sb katkılandı ında 0,06 ve Bi katkılandı ında 0,07 üstel de eri ile de i mektedir. Bu çalı mada bulunan üstel de erler (0,04-0,07), Tablo 4.10'dan görüldü ü gibi Al esaslı ala ımların üzerine literatürde yer alan çalı malardaki [109, 125, 126, 127] üstel de erler (0,07-0,09) ile oldukça iyi uyum içerisindedir. Ayrıca bu üstel de erler, Engin [46] Al-12Si-5Ni-0,4Fe ve Al-11,7Si-1Fe ala ımları için 0,12, Yılmazer [127] Al-13,6Cu-6Si için 0,14, Kaygısız ve ark. [97] Al-12,95Si-4,96Mg için 0,13 üstel de erinden biraz dü üktür.

Tablo 4.10'dan da görüldü ü gibi, bu çalı mada elektriksel özdirencin katıla tırma hızının deneysel olarak ölçülen elektriksel özdirenç de erleri mikroyapının 0,16-0,13 üstel de erleri literatürde yer alan [109, 126] benzer çalı malarla uyum içerisindedir.

Bu çalı mada Al-Si ötektik ala ımına Cu, Co, Ni, Sb ve Bi elementleri katkılanarak döküm fazında termal özellikleri (erime sıcaklı ı, entalpi ve öz ısı) incelenmi tir. Benzer ala ım sistemleri için literatürde yer alan deneysel sonuçlar Tablo 4.11'de verilmi tir.

Ala 1m (%a .)	H (J/g)	$C_{p}\left(J/gK ight)$	Referans
Al-12,6Si-2Cu	260,84	0,304	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Co	235,61	0,271	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Ni	209,31	0,244	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Sb	282,60	0,326	[Bu çalı ma]
Al-12,6Si-2Bi	248,05	0,285	[Bu çalı ma]
Al	396,96	0,897	[126]
Ni	297,83	0,444	[126]
Al-5,7Ni	53,43	0,236	[126]
Al-7Si-0,7Mg	253,4	0,296	[114]
Al-7Si-0,7Mg-0,9Sm	257,7	0,302	[114]
Al-7Si	115,6	0,124	[129]
Al-12Si	468,2	0,563	[130]
Al-18Si	443,44	0,463	[130]
Al-8,1Cu-3Si		1,089	[131]
Al-8Cu-1Si	289,6	1,063	[132]
Al-1Ni		0,902	[128]
Al-1,1Sb	81,73	0,332	[141]
Al-8Ni-5Nd-4Si	45,307	0,0528	[104]
Al-23,9Cu-1,2Co	204,8	0,324	[127]
Al-13,6Cu-6Si	331,4	0,581	[127]
Al-11,1Si-4,2Ni	411,03	0,485	[125]

Tablo 4.11 Entalpi ve öz ısı de erleri üzerine yapılan bazı çalı malar.

Bu tez çalı masında elde edilen H de erleri, Hangxu ve ark. [114] Al-7Si-0,7Mg ala ımı için 253,4 J/g, Ferreira ve ark. [132] Al-8Cu-1Si için 289,6 J/g, Yılmazer [127] Al-23,9Cu-1,2Co için 204,8 J/g de erlerine yakın çıkmı tır. Piatkowski ve ark. [130] Al-12Si ala ımından elde edilen 468,2 J/k, Kaya ve ark. [125] Al-11,1Si-4,2Ni ala ımında elde edilen 411,035 J/k de erinden daha dü ük çıkmı tır. Bu tez çalı masında elde edilen C_p de erleri, Hangxu ve ark. [114] Al-7Si-0,7Mg ala ımında elde edilen C_p (0,296 J/gK) de erine yakın, Piatkowski ve ark. [130] Al-12Si ala ımından elde edilen C_p (0,563 J/gK) de erinden daha dü ük çıkmı tır.

4.2.2 Katkılama Elementlerinin Fiziksel Özelliklere Etkisi

Al-Si ötekti ine yapılan katkılama elementlerinin (Cu, Co, Ni, Bi, Sb) ala ımın mikroyapısında de i ikli e sebep oldu u, yeni intermetalik fazların ortaya çıktı ı gözlenmi tir. Cu katkılandı ında, levhasal Si fazının yanı sıra Al₂Cu intermetalik fazın; Co katkılandı ında, Co₂Al₉; Ni katkılandı ında, Al₃Ni ve Bi katkılandı ında, AlBi intermetalik fazın olu tu u gözlenmi tir. Literatürde yer alan çalı malarda da Mohamed ve ark. [85], Al-10,8Si ala ımına Fe, Mn, Cu ve Mn elementlerinin katkılanmasının malzemenin mikroyapısında intermetalik fazın (Al₅Cu₂Mg₈Si₆) hacminin ve küçük çokgen parçacıkların veya yıldız benzeri parçacıkların arttı ını, Zeren ve ark. [86], Al-Si ötektik ala ımına %(2, 3, 4, 5) oranlarında Cu katkılanmasının malzemenin mikroyapısında de i ikli e sebep oldu unu ve intermetalik fazın (Al₂Cu) olu tu unu, Rios ve ark. [90], Al-Nb ötektik ala ımına Cu, Si, Ni, Ti, Cr katkılanmasının ala ımın mikroyapısında hücreler içerisinde lamelsel yapı ile hücresel ötektik morfoloji olu tu unu, Öveço lu ve ark. [91], Al-8Si-5,1Cu ala ımının mikroyapısında Al, Si ve Al₂Cu fazlarının mevcut oldu unu gözlemi lerdir.

Yapılan literatür ara tırmasında katkılama i lemlerinin, ala ımların mekaniksel özelliklerini iyile tirmek amacı ile yapıldı 1 görülmektedir. Bu çalı mada, Al-12,6Si ötektik ala ımına %2Cu katkılandı ında çekme dayanımı de eri en yüksek katıla tırma hızı için 158,4 MPa olarak ölçülmü tür. Bu de er Garcia ve ark. [133], Al-7Si ala ımına %1,5Cu katkılayarak ölçülen 159 MPa çekme-dayanımı de erine oldukça yakın, Wang ve ark. [139] Al-13Si ala ımına %3Cu katkılayarak ölçtükleri 310 MPa, Yang ve ark. [134], Al-12,5Si-2,5Cu-0,03Fe-0,21Mn-1Mg-2Ni ala ımına %2,5 Cu katkılayarak ölçtükleri 263 MPa de erlerinden dü üktür. Bu çalı mada Al-Si ötektik ala ımına %2Ni

katkılandı ında çekme-dayanımı de eri en yüksek katıla tırma hızı için 142,7 MPa olarak ölçülmü tür. Bu de er Emamy ve ark. [115] Al-15Mg₂Si ala ımına %3Ni katkılayarak ölçülen 193 MPa, Garcia ve ark. [133] Al-7Si ala ımına %1,5Ni katkılayarak ölçülen 154 MPa çekme-dayanımı de erleri ile nispeten örtü mektedir. Bu çalı mada Al-Si ötekti ine katkılanan %2Ni ala ımı için 16,27 μ m/s de erinde ölçülen 94,70 MPa de eri, Al-12Si-2Ni [106] için 16,60 μ m/s de erinde ölçülen 68,70 MPa de erinde biraz yüksek çıkmı tır. Al-Si ötekti ine %2Co katkılandı ında 16,57 μ m/s de erinde ölçülen 118,03 MPa çekme-dayanımı de eri, Al-12Si-2Co [106] için 16,60 μ m/s de erinde ölçülen 128,80 MPa de erine oldukça yakındır.

Bu çalı mada Al-Si ötekti ine %2Cu katkılanması ile ölçülen 6,36x10⁻⁸ Ω m elektriksel özdirenç de eri, Brandt [124] Al-11Si-3Cu ala ımı için ölçülen 5,95x10⁻⁸ Ω m, Al-9Si-2Cu için ölçülen 5,20x10⁻⁸ Ω m elektriksel özdirenç de erine çok yakın çıkmı tır. Al-12,6Si ötekti ine %2Ni katkılandı ında 16,27 µm/s için ölçülen 7,07x10⁻⁸ Ω m elektriksel özdirenci, Al-12Si-2Ni [106] için 16,60 µm/s için ölçülen 6,97x10⁻⁸ Ω m, Al-12,6Si ala ımına %2 Co katkılanarak 16,57 µm/s için ölçülen 6,78x10⁻⁸ Ω m de eri, Al-12Si-2Co [106] için 16,60 µm/s için ölçülen 6,04x10⁻⁸ Ω m elektriksel özdirenç de erine oldukça yakın çıkmı tır.

Al-Si ötekti ine yapılan katkı elementleri ala ımın erime sıcaklı ını (831,61K), entalpisini (468,2 J/g) ve öz ısısını (0,563J/gK) [130] dü ürdü ü gözlenmi tir. Literatürde yapılan benzer çalı malarda, Hangxu ve ark. [114] Al-7Si-0,7Mg ala ımına %0,9 Sm katkılayarak ala ımın entalpisinin 253,4 J/g'dan 257,7 J/g'a, öz ısısının ise 0,296 J/gK'den 0,302 J/gK'e yükseldi ini, erime sıcaklı ının ise 855,6 K'den 850,7 K de erine dü tü ünü, Piatkowski ve ark. [130] Al-12Si ala ımının Si oranını artıklarında (%18) entalpi de erinin 468,2 J/g'dan 443,44 J/g de erine, öz ısı de erinin 0,563 J/gK'den 0,463 J/gK de erine dü tü ünü bulmu lardır.

4.3. Ara tırma Sonuçları

Bu tez çalı masında, Al-Si ötektik ala ımına %2 oranında Cu, Co Ni Sb ve Bi elementleri ayrı ayrı katkılanarak Al-a .%12,6Si-a .%2X (X=Cu, Co Ni Sb ve Bi) ala ım sistemleri elde edikten sonra sabit sıcaklık gradyenti ve farklı katıla tırma hızlarında do rusal olarak katıla tırıldı. Elde edilen numunelerin mikroyapısı,

mikrosertlik, çekme-dayanımı ve elektriksel özdirenç de erleri, ısısal özelliklerinden entalpi ve öz ısı de erleri incelendi. Katkılama elementlerinin ala ımın mikroyapısına, mekanik, elektriksel ve ısısal özelliklerine etkisi ara tırıldı. Katıla tırma parametresine ve mikroyapı parametresine ba lı olarak, mikrosertlik, çekme-dayanımı, elektriksel özdirenç de erlerinin nasıl de i ti i incelendi ve DSC analizleri yapılarak entalpi ve öz ısı de erleri belirlendi. Katkılanan elementlerin Al-Si ötekti inin fiziksel özelliklerine etkisi ara tırıldı.

Bütün ala ım sistemleri için unlar söylenebilir:

1-Katıla tırma hızının artan de erlerine göre mikroyapı parametresi de erleri azalmaktadır.

2- Katıla tırma hızının artan de erlerine göre mikrosertlik ve çekme-dayanımı de erleri artarken, artan mikroyapı parametresi de erlerine göre mikrosertlik ve çekme-dayanımı de erleri azalmaktadır.

3- Katıla tırma hızının ve sıcaklı ın artan de erlerine göre elektriksel özdirenç de erleri artarken, artan mikroyapı parametresine göre elektriksel özdirenç de erleri azalmaktadır.

4- Katkılama elementlerinin (Cu, Co, Ni, Sb ve Bi) Al-Si ötekti inin mikroyapısında de i ime yol açtı 1, katkılanan elemente göre de i ik intermetalik fazların olu tu u gözlenmi tir.

5- Al-Si ötektik ala ımına katkılanan Cu, Co, Ni, Sb ve Bi elementlerinin mikrosertlik de erini artırdı 1, en fazla artı Cu katkılanarak elde edilen Al-Si-Cu ala ımında gözlenmi tir.

6- Al-Si ötektik ala ımına katkılanan elementlerin malzemenin elektriksel özdirencini artırdı 1, en fazla artı Bi katkılanarak elde edilen Al-Si-Bi ala ımında gözlenmi tir.

7- Al-Si ötektik ala ımına yapılan katkılama elementlerinin Al-Si ötekti inin erime sıcaklı ını, entalpi ve öz ısı de erilerini dü ürdü ü, en küçük de erler (856 K, 209,31 J/k ve 0,244 J/gK) Ni katkılanarak elde edilen Al-Si-Ni ala ımında ölçülmü tür.

Gelecekte, istenilen amaca uygun malzeme üretebilmek için ala ıma yapılan katkılama elementlerinin kompozisyonları de i tirilerek, kompozisyonun fiziksel özelliklere etkisinin incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca katkılama yapılarak elde edilen ala ımlar tavlama i lemine tabi tutularak, tavlama zamanının katkı yapılan ala ımın mikroyapı, mikrosertlik, çekme-dayanımı, elektriksel özdirenç ve termal özelliklerine (entalpi ve öz ısı) etkisinin ara tırılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Thornton, P.A, 1985. Fundementals of engineering materials. Prentica-Hall Inc. Enlewood Cliffs, 171-173.
- Gündüz, M., 1984. The Measurement of The Solid-Liquid Energy. Oxford University, PhD Thesis, Oxford.
- 3. Onaran, K., 1986. Malzeme Bilimi. Ça layan Basımevi, stanbul.
- Çadırlı, E., 1997. kili Metalik Ala ımlarda Do rusal Katıla tırma. Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri.
- Kaya, H., 2001. kili Ötektik Ala ımların Do rusal Katıla tırılması ve Mekaniksel Özelliklerinin ncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi, Ankara.
- Eshelman, M.A., Seetharaman, V., Trivedi, R., 1988. Cellular spacings-I. steady state growth. Acta Metallurgica, 36: 1165-1174.
- 7. Easterling, K., 1990. Tomorrow's Materials, Ins. Metals Monograph. London.
- Askeland, D.R., 1990. The Science and Engineering of Materials. Chapman and Hall, London.
- Çadırlı, E., Gündüz, M., 2000. The dependence of lamellar spacing on growth rate and temperature gradient in the lead-tin eutectic alloy. Journal of Materials Processing Tecnology, 97: 74-81.
- Colling, D.A., 1995. Industrial Materials, Metals and Alloys. Prentice Hall Inc., Ohio.
- 11. Yılmaz, F., Ala ımlar, 1985, .T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi, 54, 43-111.
- Zemskov, V.S., Belaya, A.D., Kozhemyakin, G.N., Lyuttsau, V.G. and Kostyukova, Y.P., 1985. Growth of single crystals of bismuth-antimony alloys by czochralski method. Journal of Crystal Growth, 71: 243-245.
- 13. Flemings, M.C., 1974, Solidification Processing, McGraw-Hill, 2, Newyork.
- Gündüz, M. and Çadırlı, E., 2002. Directional solidification of aluminiumcopper alloys. Materials Science Engineering: A, 327: 167-185.
- Chaubey, S., 2007. A unified model approach for estimating the range of liquid immiscibility in binary monotectic systems and revaluation of aluminiumindium (Al-In) phase diagram. Transactions of The Indion Institute of Metal, 60 (6): 559-562.

- Liu, DM., Li, XZ., Su, YQ., Rettenmary, M., Guo, JJ., Fu, HZ., 2014. Local melting/solidification during peritectic solidification in a step temperature gradient: Analysis of a directionally solidification Al-25at%Ni. Applied Physics A-Materials Science & Processing, 116 (4): 1821-1831.
- Xu, JJ., Chen, YQ., Li, XM., 2014. Global instabilities of lameller eutectic growth in directional solidification. Journal of Crystal Growth, 401: 99-105.
- ahin, M., Çadırlı, E., Kaya, H., 2010. Influence of the solidification parameters on dendritic microstructures in unsteady-state directionally solidified of lead-antimony alloy. Surface Review and Letters, 17: 477-486.
- Kaya, H., Çadırlı, E., Böyük, U., Mara lı, N., 2008. Variation of microindentation hardness with solidification and microstructure parameters in the Al based alloys. Applied Surface Science, 255: 3071-3078.
- Santos, G.A., Neto, C.M., Osorio, W.R. and Garcia, A., 2007. Design of mechanical properties of a Zn27Al alloy based on microstructure dendritic array spacing. Materials and Design, 28: 2425-2430.
- Engin S., Böyük, U., Kaya, H., Mara II, N., 2011. Directional solidification and physical properties measurements of the zinc-aluminum eutectic alloy. International Journal of Metallurgy and Materials, 18: 659-664.
- Kaya, H., Gündüz, M., Çadırlı, E., Mara lı, N., 2009. Dependency of microindentation hardness on solidification processing parameters and cellular spacing in the directionally solidified Al based alloys. Journal of Alloys and Compounds, 478: 281-286.
- Böyük, U. and Mara II, N., 2009. The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn-Ag-Cu eutectic alloy. Journal of Alloys and Compounds, 485: 264-269.
- Çadırlı, E., Böyük, U., Kaya, H., and Mara lı, N., 2011. Determination of mechanical electrical and thermal properties of the Sn-Bi-Zn ternary alloy. Journal of Non-Crystalline Solids, 357: 2876-2881.
- Osorio, W.R. and Garcia, A., 2002. Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn-Al alloys as a function of solidification conditions. Materials Sciance and Engineering: A, 325: 103-111.

- Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., 2010. The effects of cell spacing and distribution of intermetallic fibers on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Fe alloys. Materials Chemistry and Physics, 119: 272-278.
- Porter, D.A., Easterling, K.E., 1984. Phase trasnformation in metals and alloys.
 Van Nostrand and Reinhold, New York, 1-17, 217-223.
- Turnbull, D., 1950. Formation of crystal nuclei in liquid metals. Journal of Applied Physics, 21: 1022-1029.
- Turnbull, D., 1950. Isothermal rate of solidification of small droplets of mercury and tin. Journal of Chemical Physics, 18: 768-775.
- Burden, M.H., Hunt, J.D., 1974. Cellular and dendritic growth II, Journal of Crystal Growth, 22: 109-116.
- Rutter, J.W., Chalmers B., 1953. Prismatic substructure formed during solidification metals. Canadian Journal of Physics, 31: 15-39.
- 32. Davies, G.J., 1973. Soldification and Casting, John Wiley and Sons. New York
- 33. Flemings, M.C., 1974. Solidification Processing, Mc Graw Hill. NewYork.
- 34. web.sakarya.edu.tr/mcolak/dersnotu/Katila ma.pdf
- Elliott, R., 1983. Eutectic solidification processing crystalline and glassy alloys.
 Butterworths, Manchester 2-7, 20-24, 58-60.
- Böyük, U., Mara lı,N., Çadırlı, E., Kaya, H., Ke lio lu K., 2012. Varitation of microhardness with solidification parameters and electrical resistivity with temperature for Al-Cu-Ag eutectic alloy. Current Applied Physics 12: 7-10.
- Jianglei, F., Xinzhong L., Yanqing S., Jingjie, G., Hengzhi F., 2012. Effect of growth rate on microstructure parameters and microhardness in directionally solidified Ti-49Al alloy. Materials and Design, 34: 552-558.
- Böyük, U., 2009. Üçlü Metalik Ala ımların Kontrollü Do rusal Katıla tırılması ve Mikrosertli inin ncelenmesi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Tobita, T., Nakagowa S., Takeuchi, T.,Suziki, M., Ishikawo, N.,Chimi, Y., Saitoh, Y., Ishino, S., Saitoh, Y., Soneda, N., Nishida, K., 2014. Effect of irradiation induced Cu clustering on vickers hardness and electrical

resistivity of Fe-Cu model alloys. **Journal of Nuclear Materials, 452:** 241-247.

- Premovic, M., Minic, D., Manasjevic, D., Cosovic, V., Zivkovic, D., Dervisevic, I., Talijan, N., 2014. Mechanical and electrical properties of the ternary Ag-Sb-Zn system. Acta Metallurgica Sınıca-English Letters, 27: 47-54.
- Zhu, C., Ma, A., Jiang, J., Li, X., Song, D., Yang, D., Yuan, Y., Chen, J., 2014. Effect of ECAP combined cold working on mechanical properties and electrical conductivity of comform-produce Cu-Mg alloys. Journal of Alloys and Compounds, 582: 135-140.
- Weissbach, W., 1993. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Çev.: Anık, S., Anık, E., Vural, M., Birsen Kitapevi, stanbul.
- 43. http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/metal/modu ller/sertlik_olcme_yontemleri.pdf
- William, F. Smith, 2001. Malzeme Bilimi ve Mühendisli i, Nihat, G., Kınıko lu, Literatür Yayıncılık, stanbul.
- Knoop, F., Peters, C.G., Emerson, W.B., 1939. A sensitive pyramidal-diamond tool for indentation measurements. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 23: 39-61.
- 46. Engin Sevda, 2013. Kontrollü Katıla tırılan Çok Bile enli Ötektik Ala ımların, Mekaniksel ve Elektriksel Özelliklerinin Katıla tırma Parametrelerine Ba lılı ının ncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi.
- 47. http://web.itu.edu.tr/ozgulkeles/dersler/MalzemeBilimi_06_2010.pdf
- Drude, P., 1900. Zur Elektronentheorie Der Metalle. Annalen Der Physik 1(4), 566-613.
- Drude, P., 1902. Zur Elektronentheorie Der Metalle. Annalen Der Physik 7(4), 687-692.
- 50. Lorentz, H.A., 1904-1905. Proceedings of the Academy Science. Amsterdam, 7,438, 585, 68.
- Halliday, D., Resnick, R., 1981. Fundamental of Physics, John Willey and Sons Incorporated,
- 52. Turgut, Y., 2012. Metalik Esaslı Ala ım Sistemlerinin Tek Yönlü Do rusal Katıla tırılması. Ni de Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ni de.

- 53. Kittel, C., Introduction to Solid State Physics, John Willey and Sons Incorporated, 6. Edition, Newyork, USA
- 54. Karahan, .H., 2002. Elektrokimyasal Depolama Yoluyla Elde Edilen CuCo ve Cu-Co-Ni Ala ım Filmlerinin Yapısal ve Magnetorezistans Özellikleri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Jones, H., Kurz, W., 1981. Raltion of interphase spacing and growth temperature to growth velocity in Fe-C-(Fe-Fe3C) eutectic alloys. Z. Metallkunde, 4: 792-797.
- Stoeckel D., 2011. Forming of nitinol a challenge. New Depelopments in Forging Techology, 119-134.
- Clark, D.S., 1959. Engineerin Metals and Process. Ohio University, PhD. Thesis, Ohio.
- 58. Haasen, P., 1974. Physical Metallurgy, Cambridge University Press, Cambridge.
- 59. MetalsHandbook, 1988. Second Edition., ASM International.
- Hunt, J.D., 1979. Solidification and Casting of Metals. The Metal Society, London, 3-9.
- Guldberg S., Ryum N., 2000. Microstructure and crystallographic orientation relationship in directionally solidified Mg-Mg17Al12 eutectic. Materials Science and Engineering A, 289: 143-150.
- 62. http://web.itu.edu.tr/~dikicioglu/WEBMAL201/Mal201FazFeCYenidenKris tal(5).pdf
- 63. Mullins, W.W., Sekerka, R.F., 1963. Morphological stability of a particle growing by diffussion or heat flow. **Journal Applied Physics**, **34:** 323-329.
- Jackson, K.A., Hunt, J.D., 1965. Transparend compounds that freeze like metals.
 Acta Metallurgica, 13: 1212-1215.
- 65. Trivedi, R., 1980. Theory of dendritic growth during the directional solidification of binary alloys. Journal of Crystal Growth, 49: 219-232.
- Flemings, M.C., 1976. Döküm ve Katıla tırma Tekni i. Çev.: Ba aran, M., TÜ Matbaası, stanbul.
- Hunt, J.D, Jackson, K.A., 1966. Binary eutectic solidification. Transactions of the Metallurgical Society, 236: 843-852.
- 68. Scheil, E., 1959. On Eutectic crystallization. Geisserei Tech. Wiss., 24: 1313.

- Chadwick, G.A., 1962. Decanted interfaces and growth forms. Acta Metallurgica, 10: 1-12.
- Croker, M.N., Fidler, R.S., Smith, R.W., 1971. The cellular growth of Bi-Pb₂Bi eutectic. Journal of Crystal Growth, 11: 121-131.
- Croker, M.N., Baragar, D., Smith, R.W., 1975. Anomalous eutectic growth II. Journal of Crystal Growth, 30: 198-212.
- Eliot, R., 1977. Eutectic solidification. International Metals Rewiews, 219: 161-186.
- 73. Kraft, R.W., Albright, D.L.A., 1961. Microstructure of unidirectionally solidified Al-CuAl₂ eutectic. Transactions of the Metallurgical Society, 221: 95-102.
- Graham, L.D., Kraft, R.W., 1966. Coarsening at of eutectic micro structure at eveleated temperatures. Transactions, 236: 94-102.
- 75. Liao H., Sun Y., Sun G., 2002. Correlation between mechanical properties and amount of dendritic a-Al phase in as-cast near-eutectic Al–11,6%Si alloys modified with strontium. Materials Science Engineering: A, A335: 62–6.
- 76. Lasa L, Rodrigues-Ibade JM., 2003. Wear mehaviour of eutectic and hypereutectic Al–Si–Cu–Mg casting alloys tested against a composite brake pad. Materials Science and Engineering: A, 363: 193–2002.
- 77. Dobrzanski, L.A., Maniara, R., Sokolowski, J.H., 2006. The effect of cast Al-Si-Cu alloy solidification rate on alloy thermal characteristics. Journal of Nchievements in Materials and Manufcturing Engineering, 17: 1-2.
- McDonald S., Nogita K., Dahle A., 2004. Eutectic nucleation in Al–Si alloys.
 Acta Materials, 52: 4273–80.
- Zeren Muzaffer, Karakulak Erdem, 2008. Influence of Ti addition on the microstructure and hardness properties of near-eutectic Al–Si alloys. Journal of Alloys and Compounds, 450: 255–9.
- Liao, H., Zhang M., Wu Q., Wang H., Sun G., 2007. Refinement of eutectic grains by combined addition of strontium and boron in near-eutectic Al–Si alloys. Scripta Materialia, 57: 1121–4.
- Shu-zu, Lu., Hellawell A., 1985. Growth mechanisms of silicon in Al–Si alloys.
 Journal of Crystal Growth, 73: 316–20.

- Shu-zu Lu, Hellawell A., 1987. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning. Metallurgical and Materials Transactions A, 18A: 1721–5.
- H, Sun Yu, Sun G., 2002. Effect of Al–5Ti–1B on the microstructure of neareutectic Al–13,0 Si alloys casting alloys. Journal of Material Science, 37: 3489–95.
- Haque, M.M., Sharif, A., 2001. Study on wear properties of aluminium-silicon piston alloy. Journal of Materials Processing Techonology, 118: 69-73.
- A.M.A. Mohamed, A. M. Samuel, F.H., Samuel, H.W. Doty, 2009. Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al-10,8%Si cast alloy. Materials and Design, 30: 3943-3957.
- Zeren, M., Karakulak, E., Gümü, S., 2011. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu alloys. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21: 1698-1702.
- Farahany, S., Ourdjini, A., Idrsi, M., H., Shabestari, S. G., 2013. Evaluation of the effect of Bi, Sb, Sr and cooling condition on eutectic phase in an Al-Si-Cu alloy (ADC12) by in situ thermal analysis. Thermochimica Acta, 559: 59-68.
- Beomjun, K., Chang-Woo L., Dongyum L., Namhyun K., 2014. Effect of Sb addition on Bi-2,6Ag-0,1Cu solders for high-temperature applications. Journal of Alloys and Compounds, 592: 207-212.
- Gündüz, M., Kaya, H., Çadırlı E., Özmen, A., 2004. Interflake spacings and undercoolins in Al-Si irregular eutectic alloy. Materials Science and Engineering A, 369: 215-229.
- Rios, C.T., Milenkovic, S. and Caram, R., 2000. Directional growth of Al-Nb-X eutectic alloys. Journal of Crystal Growth, 211: 466-470.
- 91. Öveço lu, M.L., Ünlü, N., Eruslu, N., Genç, A., 2003. Characterization investigations of a melt-spun ternary Al-8Si-5,1Cu alloy. Materials Letters, 5: 3296-3301.
- Ourdjini, A., Yılmaz, F., Hamed, O.S., Eliot, R., 1992. Microstructure and mechanical properties of directionally solidification Al-Si eutectic alloys with and without antimony. Materials Science and Techonology, 8: 774-776.

- Hosch, T., England, L.G. and Napolitano, R.E., 2009. Analysis of the high growth-rate transition in Al-Si eutectic solidification. Journal of Materials Science, 44: 4892-4899.
- 94. Steinbach S., Ratke, L., 2009. Melt flow in a mushy zone-barrier effect of intermetallic phases. International Journal of Cast Metals Research, 22: 1-4.
- Steinbach, S., Ratke L., 2007. Experimental study on interaction of fluid flow and solidification in Al-Si-Cu alloys. International Journal of Cast Metals Research, 20: 140-144.
- Böyük, U., Engin,S., Mara II, N., 2011. Microstructural characterization of unidirectional solidified eutectic Al-Si-Ni alloy. Materials Characterization, 62: 844-851.
- Kaygisiz, Y., Mara li, N., 2015. Microstructural, mechanical and electrical characterization of directionally solidified Al-Si-Mg eutectic alloy. Journal of Alloys and Compounds, 618: 197-203.
- Steinbach, S. and Ratke, L., 2007. The influence of fluid flow on the microstructure of directionally solidified AlSi-base alloys. Metallurgical and Materials Transactions, 38A: 1388-1394.
- Rohatgi, P.K., Sharma, R.C., Prabhakar, K.V., 1975. Microstructure and mechanical properties of unidirectionally solidified Al-Si-Ni ternary eutectic. Metallurgical Transactions A, 6 (3), 569-575.
- Yılmaz F., Elliot R., 1989. The microstructure and mechanical properties of unidirectionally solidified Al-Si alloys. Journal of Material Science, 24: 2065-2070.
- 101. Khan, S., Ourdjini, A., Hamed, Q.S., Alam Najafabadi, M.A., Eliot, R., 1993. Hardness and mechanical property relationship in directionally solidified aluminium-silicon eutectic alloys with different silicon morphologies. Journal of Materials Science, 28: 5957-5962.
- 102. Kaya H., Çadırlı E., Gündüz M. and Ülgen A., 2003. Effect of the temperature gradient, growth rate, and the interflake spacing on the microhardness in the directionally solidified Al-Si eutectic alloy. Journal of Materials Engineering and Performance, 12(5): 544–551.

- Karaköse E., Keskin, M., 2009. Morphological characteristic of the conventional and melt-spun Al-10Ni-%6Cu alloy. Materials Characterization, 60: 1569-1577.
- Karaköse E., Keskin, M., 2012. Microstructures and microhardness evolutions of melt-spun Al-8Ni-5Nd-4Si alloy. Materials Characterization, 65: 37-47.
- 105. Kılıçaslan, F., Yılmaz, F., Ergen, S., Hong, S., Uzun, O., 2013. Microstructure and microhardness of melt-spun Al-25Si-5Fe-XCo (X=0,1,3,5) alloys, Materials Characterization, 77: 15-22.
- 106. Yavuz A., 2014. "Demir, Nikel ve Kobalt Katkılanmı Alüminyum-Silisyum Ala ımının Mikroyapı, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin ncelenmesi". Yüksek Lisans, Erciyes Üniversitesi, Eylül.
- 107. Karaköse, E., Keskin M., 2009. Effect of solidificaton rate on the microstructure and microhardness of a melt-spun Al-8Si-1Sb alloy. Journal of Alloys and Copounds, 479: 230-236.
- 108. Silva, B.L., Araujo, J.C., Silva, W.S., Goulart, P.R., Garcia, A. and Spinelli, J.E., 2011. Correlation between dendrite arm spacing and microhardness during unsteady-state directional solidification of Al-Ni alloys. Philosophical Maganize Letters, 91: 337-343
- 109. Kaya, H., Böyük, U., Çadırlı, E., Mara lı, N., 2013. Influence of growth rate on microstructure, microhardness, and electrical resistivity of directionally solidified Al-7wt% Ni hypo-eutectic alloy. Metals and Materials International, 19 (1): 39-44.
- Aker, A., Kaya, H., 2013. Measurements of microstructural, mechanical, electrical and thermal properties of an Al-Ni alloy. International Journal Thermophys, 34: 267-283.
- 111. Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J. and Fu, H., 2010. The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Ti-43Al-3Si alloy. Journal of Alloys and Compounds, 506: 593-599.
- 112. Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J. and Fu, H., 2010. Dependency of microhardness on solidification processing parameters and microstructure characteristics in the directionally solidified Ti-46Al-0,5W-0,5Si alloy. Journal of Alloys and Compounds, 504: 60-64.

- Zeren, M., 2005. Effect of copper and silicon content on mechanical properties in Al-Cu-Si-Mg alloys. Journal of Materials Processing Technology, 169: 292-298.
- 114. Hangxu, Q., Hang,Y., Zhi, H., 2013. Effect of samarium addition on the microstructures and mechanical properties of Al-7Si-0,7Mg alloys. Journal of Alloys and Compounds, 567: 77-81.
- 115. Emamy, M., Khodadadi,M., Honarbakhsh, A., Nasiri,N., 2013. The influence of Ni addition and hot-extrusion on the microstructure and tensile properties of Al-15%Mg₂Si composite. Materials and Design, 46: 381-390.
- 116. Shin S., Kim, E.S., Yearn, G.Y., Lee, J.C., 2012. Modification effect of Sr on the microstructure properties of Al-10.5Si-2Cu recyled alloy. Materials Science and Engineering A, 532: 151-157.
- 117. Li, Q., Xia, T., Lan, Y., Li, P., Fan, L., Zhao, W., L., 2013. Effect of rare earth cerium addition on microstructure and tensile properties of hypereutectic Al-20%Si alloy. Journal of Alloys and Copounds 562: 25-32.
- Li, Q., Xia, T., Lan, Y., Li, P., Fan, L., 2013. Effect of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20%Si alloy. Materials Science and Engineering A, 588: v97-102.
- Zhi, H., Yan, h., Yuan-sheng, R., 2013. Effects of samarium addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Al-Si-Cu alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23: 3228-3234.
- Sha, M., Wu, S., Wang, X., Won, L., An, P., 2012. Effect of cobalt content on microstructure and mechanical properties of hyoereutectic Al-Si alloys. Materials Science and Engineering A, 535: 258-263.
- Cante, M.V., Spinelli, J.E., Cheung, N. and Garcia, A., 2010. The correlation between dendritic microstructure and mechanical properties of directionally solidified hypoeutectic Al-Ni alloys. Metals and Materials International, 16: 39-49.
- 122. Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Osorio, W.R. and Garcia, A., 2006. Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al-Si castings. Materials Science and Engineering A., 421: 245-253.
- 123. Smiths, F.M., 1958. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe.Bell System Technology Journal, 37: 711.

- 124. Brandt, R., and Neuer, G., 2007. Electrical resistivity and thermal conductivity of pure aluminum and aluminum alloys up to and above the melting temperature. **International Journal of Thermophysics**, **28**, (5): 1429-1446.
- Böyük, U., 2012. Physical and mechanical properties of Al–Si–Ni eutectic alloy.
 Metals and Materials International, 18, (6): 933-938.
- 126. Kaya, H., Böyük, U., Çadırlı, E., Mara lı, N., 2012. Measurements of the microhardness, electrical and thermal properties of the Al-Ni eutectic alloy, Materials and Design, 34: 707-712.
- 127. Yılmazer, M, ., 2014. Bilgisayar Kontrollü Katıla tırılan Üçlü Metalik Ala ımların Yapı ve Fiziksel Özelliklerinin Ara tırılması. Ni de Üniversitesi, Doktora Tezi, Ni de.
- 128. Pariona, M.M., Rugenski, J.K., Canté, M.V., Spinelli, J.E. ve A., G., 2010.
 "Thermal stress analysis of a directionally solidified Al-1wt%Ni alloy casting". Finite Elements in Analysis and Design, 10(46): ss.889–95.
- 129. Zhou, B.H., Jung, H., Mangelinck N., Thi,H., Billia, B., Lui,Q.S., Lan, C.W., 2008. Comparative study of the influence of natural convection on directional solidification of Al-3,5Ni and Al-7Si alloys. Advances in Space Research, 41: 2112-2117.
- Piatkowski J., Gajdzik B., 2013. Testing phase changes in Al-Si alloys with application of thermal analysis and differential calorimetric analysis. Metalurgija, 52: 469-472.
- Ferreira, L., Garcia A., Nestler, B., 2004. On macrosegregation in ternary Al-Cu-Si alloys: Numerical and experimental analysis. Scripta Materialis, 50: 407-411.
- 132. Ferreira, L., Lins, F., Mountinho D., Gomes L., Garcia, A., 2010. Numerical and experimental investigation of microporosity formation in a ternary Al-Cu-Si alloy. Journal of Alloys and Compounds, 503: 31-39.
- 133. Garcia, J.A., Gonzales C.R., Gonzolez G.M., Houbaert, Y., 2003. Structure and properties of Al-7Si-Ni and Al-7Si-Cu cast alloys nonmodified and modified with Sr. Journal of Materials Processing Technology, 143-144: 306-310.
- 134. Yang, Y., Yu, K., Li,Y., Zhao, D., Liu,X., 2012. Evolution of nikel-rich phases in Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloys with different Cu additions. Materials and Design 33: 220-225.

- 135. Sha, M., Wu, S., Wan,L., 2012. Combined effects of cobalt addition and ultraasonic vibration on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys with 0,7%Fe. Materials Science and Engineering A, 554: 142-148.
- Liu, G., Li,G., Cai,A., Chen, Z., 2011. The influence of strontium addition on wear properties of Al-20Si alloys under dry reciprocating sliding condition. Materials and Design, 32: 121-126.
- Aigin, W., Lijun, Z., Jingpei, X., 2013. Effects of cerium and phosphorus on microstructures and properties of hypereutectic Al-21Si alloy. Journal of Rare Earths, 31: 522-525.
- Yıldırım, M., Özyürek, D., 2013. The effect of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys. Materials and Design, 51: 767-774.
- 139. Wang, E. R., Hui, X.D., Wang, S.S., Zhao,Y.F., Chen, G.L., 2010. Improved mechanical properties in cast Al-Si alloys by combined alloying of Fe and Cu. Materials Science and Engineering A, 527: 7878-7884.
- 140. Ceschini, L., Boromei, I., Morri, A., Seifeddine, S., Svensson, I., 2009. Microstructure, tensile and fatigue properties of the Al-10%Si-2%Cu alloy with different Fe and Mn content cast under controlled conditions. Journal of Materials Processing Technology, 209: 5669-5679.
- 141. Aker, A., Engin, S., Yılmazer, I., Kaya, H., 2013. Influence of the growth rate on physical properties in the alüminum-antimony eutectic alloy. International Journal of Materials Engineering and Technology, 9: 59-76.
- Telli, A.I. and Kısakürek, S.E., 1988. Effect of antimony additions on hardness and tensile properties of directionally solidified Al-Si eutectic alloy. Material Science Technology, 4: 153-156.
- 143. Kaya, H., Çadırlı, E., Gündüz, M., 2007. Dendritic growth in an aluminumsilicon alloy. Journal of Materials Engineering and Performance, 16: 12-21.
- 144. Geçkinli, A.E., 1989. Metalografi, I. Kısım, TÜ Kütüphanesi.
- Erimez, E., vd. 1975. Elektrik Ölçmesi Problemleri, stanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, stanbul.

- 146. Schroder, D.K., 1990. Eds Renewable Energy, 2 World Renewable Energy Congress, Pergamon Pres. Oxford, New York.
- Wenner, F., 1915. A Method of Measuring Earth Resistivity, Bulletin of Bureau of Standards, 12, 469–478.
- Lewis W., Brown C., Wilhelmus, J., 2003. Geerts Department of Physics. Texas State University at San Marcos, San Marcos, Texas 78666, USA.
- 149. Valdes, L.B., 1954. Resistivity measurements on germanium for transistors.Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 42: 420–427.
- Smiths, F.M., 1958. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. Bell System Technology Journal, 37: 711.
- 151. Caignan, A.G., Holt, E.M. 2002. New 1,4-dihydropyridine derivates with hetero.Saturated B Rings, Journal of Chemical Crystallography 32: 315-323.
- 152. Yamashita, M., 1987. Resistivity correction factor for the four-probe method.
 Journal of Physics E: Scientific Instruments, 20: 1454-1456.
- Vadbaek, 1966. Geometric Factors in Four Point Resistivity Measurement, Haldor Topsoe, Semiconductor Division.
- 154. Ruggiero, M.A., Rutter, J.W., 1997. Origin of microstructure in the 332 K eutectic of the Bi-In-Sn system. Materials Science and Technology, 13: 5-11.
- Ourdjini, A., Liu, J., Elliot, R., 1994. Eutectic spacing selection in the Al-Cu system. Materials Science and Technology, 10: 312-318.
- 156. http://tr.wikipedia.org/

EKLER

EK-1.

Ala ım(%a .)	Çekme-Dayanımı MPa	Referans
Al-13Si-0.3Ni-0.6Mn-3Cu-0.15Ti-0.4Mn-0.3F	2 310	[139]
Al-13Si-0.3Ni-0.6Mn-5Cu-0.15Ti-0.4Mn-0.3F	= 316	[139]
Al-10Si-2.3Cu-0.3Mg-0.1Fe-0.05Mn	363±14	[140]
Al-10Si-2.3Cu-0.3Mg-0.5Fe	374±2	[140]
Al-1.04Cu-18Si-0.96Mg-0.30Fe	200	[113]
Al-1.04Cu-12Si-0.90Mg-0.24Fe	180	[113]
Al-6.01Cu-0.40Si-0.97Mg-0.38Fe	402	[113]
Al-4.45Cu-0.41Si-1.06Mg-0.4Fe	360	[113]
Al-3Cu-0.38Si-1.04Mg-0.27Fe	290	[113]
Al-7Si-0,7Mg-0,3Sm	215	[114]
Al-15Mg ₂ Si	152	[115]
Al-15Mg ₂ Si-1Ni	183	[115]
Al-15Mg2Si-3Ni	193	[115]
Al-15Mg2Si-5Ni	197	[115]
Al-7Si	160	[133]
Al-7Si-0,02Sr	180	[133]
Al-7Si-0.5Cu	150	[133]
Al-7Si-0,5Cu-0,02Sr	200	[133]
Al-7Si-1,5Cu	159	[133]
Al-7Si-1,5Cu-0,02Sr	268	[133]
Al-7Si-0,5Ni	156	[133]
Al-7Si-1,5Ni	154	[133]
Al-7Si-1,5Ni-0,02Sr	178	[133]
Al-12,5Si-2,5Cu-0,03Fe-0,21Mn-1Mg-2Ni	263,8	[134]
Al-12,5Si-3,5Cu-0,04Fe-0,21Mn-1Mg-2Ni	229,6	[134]
Al-12,5Si-4,5Cu-0,12Fe-0,24Mn-1Mg-2Ni	254,8	[134]
Al-12,5Si-5,5Cu-0,19Fe-0,20Mn-1Mg-2Ni	278,9	[134]
Al-20Si-2Cu-0,7Fe-1Ni	243	[135]
Al-20Si-2Cu-0,7Fe-1Ni-1Co	275	[135]
Al-20Si	234,28	[136]
Al-20Si-0,02Sr	280,18	[136]
A1-20Si-0,04Sr	387,28	[136]
Al-20Si-0,06Sr	397,28	[136]
Al-20Si-0,08Sr	296,51	[136]
Al-20Si-0,1Sr	315,94	[136]
Al-21Si-0,6Ce-0,06P	236,2	[137]
Al-21Si-0,9Ce-0,08P	259,2	[137]
Al-21Si-0,9Ce-0,06P	278,6	[137]
Al-7Si-0,43Mg	179	[138]
Al-7Si-0,67Mg	198	[138]
Al-7Si-0,86Mg	210	[138]

EK-2.

Ala ım	Sıcaklık	Elektriksel	Referans
	Aralı 1	Özdirenç(x10 ⁻⁸ hm)	
Alüminyum	25	0,026	[156]
Silisyum	25	$0,39 \times 10^{10}$	[156]
Bizmut	25	115,3	[88]
Antimon	25	0,034	[156]
Nikel	25	0,069	[156]
Kobalt	25	0,058	[156]
Bakır	25	0,017	[156]
Al-12Si	25-550	4,25 – 12,44	[124]
Al-11Si-3Cu	25-550	5,95 - 13,49	[124]
Al-12Si-0,3Mg	25-550	4,87 – 13,40	[124]
Al-12Si-0,6Mg	25-550	5,20 - 14,27	[124]
Al-9Si-2Cu	25-550	5,57 -12,77	[124]
Al-9Si-3Cu	25-550	5,73 - 13,03	[124]
Al-11Si-1Cu	25-550	5,55 – 13,16	[124]

EK-3.

Deneysel Ba ıntılar

Al-%12,6Si-%2Cu

Ba ıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda = k_1 V^{-0,41}$	$k_1=0,736 \ (\mu m^{1,41} s^{-0,41})$	r ₁ =0,990
$HV = k_2 V^{0,09}$	$k_2 = 134,12 \text{ (kg mm}^{-2,09} \text{sn}^{0,09}\text{)}$	r ₂ =0,994
$HV=k_3\lambda^{-0,24}$	$k_3=28,37 \text{ (kg mm}^{-1,76}\text{)}$	r ₃ =0,996
$\sigma = k_4 V^{0,15}$	$k_4=214,39$ (MPa mm ^{-0,15} s ^{0,15})	$r_4 = 0,995$
$\sigma = k_5 \lambda^{0,39}$	$k_5 = 16,78(MPa mm^{0,39})$	r ₅ =0,984
$\rho = k_6 V^{0,04}$	$k_6 = 10,04 \Omega \mu m^{0.96} s^{0.04}$	r ₆ =0,999
$\rho = k_7 \lambda^{-0,13}$	$k_7 = 3,54 \Omega \mu m^{1,13}$	r ₇ =0,993

Al-12,6Si-2Co

Ba ıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda = k_1 V^{-0,40}$	$k_1 = 16,02(\mu m^{1,40} s^{-0,40})$	r ₁ =0,985
$HV = k_2 V^{0,08}$	$k_2 = 110,06 \text{ (kg mm}^{-2,08} \text{sn}^{0,08}\text{)}$	r ₂ =0,993
$HV = k_3 \lambda^{-0,18}$	k ₃ =30,22 (kg mm ^{-1,82})	$r_3 = 0,982$
$\sigma = k_4 V^{0,18}$	k ₄ =139,79 (MPa mm ^{-0,18} s ^{0,18})	r ₄ =0,987
$\sigma = k_5 \lambda^{-0,37}$	$k_5 = 17,46$ (MPa mm ^{0,37})	r ₅ =0,994
$\rho = k_6 V^{0,04}$	$k_6 = 8,48 \Omega \mu m^{0.96} s^{0.04}$	r ₆ =0,997
$\rho = k_7 \lambda^{-0,13}$	$k_7 = 2,96 \Omega mm^{1,13}$	r ₇ =0,985

Al-12,6Si-2Ni

Ba ıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda = k_1 V^{-0,43}$	$k_1 = 21,05(\mu m^{1,43} s^{-0,43})$	r ₁ =0,999
$HV = k_2 V^{0,07}$	$k_7 = 95,36$ (kg mm ^{-2,07} sn ^{0,07})	r ₂ =0,997
$HV=k_3\lambda^{-0,16}$	$k_3=31,01$ (kg mm ^{-1,84})	r ₃ =0,998
$\sigma = k_4 V^{0,16}$	$k_4 = 187,49$ (MPa mm ^{-0,16} s ^{0,16})	r ₄ =0,983
$\sigma = k_5 \lambda^{-0.37}$	k ₅ =13,82(MPa mm ^{0,37})	r ₅ =0,986
$\rho = k_6 V^{0,05}$	$k_6 = 9,21 \Omega \mu m^{0.95} s^{0.05}$	r ₆ =0,998
$\rho = k_7 \lambda^{-0,14}$	$k_7 = 3,30 \Omega \mu m^{1,14}$	r ₇ =0,993

Al-12,6Si-2Sb

Ba ıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda = k_1 V^{-0.46}$	$k_1 = 23,69(\mu m^{1,46} s^{-0,46})$	r ₁ =0,998
$HV = k_2 V^{0,05}$	$k_2 = 80,73 \text{ (kg mm}^{-2,05} \text{sn}^{0,05}\text{)}$	r ₂ =0,996
$HV=k_3\lambda^{-0,13}$	k ₃ =32,08 (kg mm ^{-1,87})	r ₃ =0,993
$\sigma = k_4 V^{0,15}$	$k_4 = 148,84$ (MPa mm ^{-0,15} s ^{0,15})	r ₄ =0,980
$\sigma = k_5 \lambda^{-0,34}$	k ₅ =159,26(MPa mm ^{0,34})	r ₅ =0,984
$\rho = k_6 V^{0,06}$	$k_6 = 9,69 \Omega \mu m^{0.94} s^{0.06}$	r ₆ =0,998
$\rho = k_7 \lambda^{-0,15}$	$k_7 = 3,36 \Omega mm^{1,15}$	r ₇ =0,996

Al-12,6Si-2Bi

Ba ıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda = k_1 V^{-0.46}$	$k_1 = 24,67(\mu m^{1,46} s^{-0,46})$	$r_1 = 0.998$
$HV = k_2 V^{0.00}$ $HV = k_3 \lambda^{-0.15}$	$k_2 = 85,26$ (kg mm ^{-1,85}) $k_3 = 31,52$ (kg mm ^{-1,85})	$r_2 = 0,991$ $r_3 = 0,997$
$\sigma = k_4 V^{0,15}$	$k_4 = 199,88 (MPa \text{ mm}^{-0.15} \text{ s}^{0.15})$	r ₄ =0,999
$\sigma = k_5 \lambda^{-0.37}$	$k_5=16,02(MPa mm^{0.57})$	$r_5=0,997$
$\rho = k_6 V^{0,07}$ $\rho = k_7 \lambda^{-0,16}$	$k_6 = 10,5052 \mu m^{-1} s^{-1}$ $k_7 = 3,31 \Omega m m^{-1,16}$	r ₇ =0,994

ÖZGEÇM

K SEL B LG LER

Adı, Soyadı: Aynur AKER

Uyru u: Türkiye (TC)

Do um Tarihi ve Yeri: 06 Ekim 1980, Sivas/Gemerek

Gsm : +90 542 536 00 58

email: aynuraker@hotmail.com

Yazı ma Adresi: Mimarsinan Mah. Köprülü Cad. timat Apt. No:13/8

Kocasinan/KAYSER

Ε Τ Μ

Derece	E itim Kurumu	Mezuniyet
Lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü	2004
Tezsiz Y. Lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Orta Ö . Fen ve Mat. Alanlar. A.B.D. Fizik Ö retmenli i	2007
Y. Lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D. Katıhal Fizi i Bilim Dalı	2010
Doktora	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik A.B.D. Katıhal Fizi i Bilim Dalı	2015

PROJE DENEY M

PROJE ADI	KURUM	TAR H	GÖREV	PROJE TÜRÜ
Al-Mn Ötektik Ala ımına Si, Cu ve Fe Katkılanmasının Dü ük ve Yüksek Katıla tırma Hızlarında Yapısal ve Mekaniksel Özelliklere Etkisinin Ara tırılması	TÜB TAK	2013-2014	Ara tırmacı	Ara tırma Projesi
Al-Cu Ötektik ala ımına yapılan katkı elementlerinin (Co, Si, Ni, Sb ve Bi) mikroyapı ve fiziksel özelliklerine etkisinin ara tırılması.	Erciyes Ünv.	2013-2015	Ara tırmacı	Normal Ara tırma Projesi
Al-Si Ötektik ala ımına yapılan katkı elementlerinin (Co, Cu, Ni, Sb ve Bi) mikroyapı ve fiziksel özelliklerine etkisinin ara tırılması	Erciyes Ünv.	2011-2013	Ara tırmacı	Doktora Tez Projesi

YAYINLAR

1. ULUSLARARASI MAKALELER

- E. Albayrak, A. Aker, Sandwiched Trilayer of Bethe Lattices in the form of Spin-(1/2,1,1/2), Journal of Magnetism and Magnetic Materials Cilt: 322 Sayfa:3281 (2010)
- E. Albayrak, A. Aker, The Spin-(1,1/2,1) Sandwiched Trilayer Bethe Lattices, Physica A Cilt: 389 Sayfa: 5677 (2010).
- A. Aker, S. Engin, Yılmazer, H. Kaya, Influence of the Growth Rate on Physical Properties in the Aluminum-Antimony Eutectic Alloy, International Journal of Materials Engineering and Technology, 9, Pages 59-76, (2013).
- A. Aker, H. Kaya, Measurements of Microstructural, Mechanical, Electrical and Thermal Properties of the Al–Ni Alloy International Journal of Thermophysics DOI 10.1007/10765-013-1401-7 (2013).

2. ULUSLARARASI KONGRELERDE SUNULAN B LD R LER

- A. Aker, S. Engin, H. Kaya, Influence of the Growth Rate on Eutectic Microstructures and Mechanical Properties of Aluminum-Antimony Eutectic Alloy TPS-29 International Physics Conference, Page 459, Mu la, Turkey, 5-8
- 2. A.Aker, H. Kaya, Influence of the growth on eutectic microstructure physical properties of Aluminum-Silicon-Cobalt Alloy, ICMSE 2014, Hollanda
- Büyük U., Aker A., Kaya H., Çadirli E., Mara li N., "Effects Of Antimony Content On Microstructure, Mechanical And Electrical Properties Of Al–Cu Eutectic Alloys", International Journal of Arts & Sciences (IJAS) Conference for Academic Disciplines, Barselona, ISPANYA, 16-19 Haziran 2014, pp.B4R52-B4R52
- 4. Çadirli E., Kaya H., Aker A., Büyük U., "Mechanical And Electrical Properties Of Directionally Solidified Al-Cu-Co Eutectic Alloy", International Journal of Arts & Sciences (IJAS) Conference for Academic Disciplines, Barselona, ISPANYA, 16-19 Haziran 2014, pp.B4R50-B4R50
- Kaya H., Aker A., Çadirli E., Büyük U., Mara lı N., "Investigation Of Physical Parameters Of The Al-Cu-Si Ternary Alloy", International Journal of Arts & Sciences (IJAS) Conference for Academic Disciplines, Barselona, ISPANYA, 16-19 Haziran 2014, pp.B4R51-B4R51

3. ULUSAL KONGRELERDE SUNULAN B LD R LER

 E. Albayrak, A. Aker, Sandwiched Trilayer of Bethe Lattices in the form of Spin-(1/2,1,1/2), Interactions 17 th Statistical Physics Congress. SABANCI ÜN VERS TES STANBUL (2010)