

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MİKROELEKTRONİK DEVRELERDE KURŞUNSUZ
LEHİM ALAŞIMLARININ ISIL, ELEKTRİKSEL,
MEKANİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Pınar ATA ESENER**

**Danışman
Prof. Dr. Bilal DEMİREL**

Doktora Tezi

**Haziran 2023
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MİKROELEKTRONİK DEVRELERDE KURŞUNSUZ
LEHİM ALAŞIMLARININ ISIL, ELEKTRİKSEL,
MEKANİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Pınar ATA ESENER**

**Danışman
Prof. Dr. Bilal DEMİREL**

Bu çalışma, YÖK 100/2000 Doktora Projesinin Mikroelektronik ve Nanoteknoloji alt alanı kapsamında yapılmış ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2020-10546 kodlu proje ile desteklenmiştir.

**Haziran 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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.

Pınar ATA ESENER

“Mikroelektronik Devrelerde Kurşunsuz Lehim Alaşımlarının Isıl, Elektriksel, Mekanik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Pınar ATA ESENER

Danışman

Prof. Dr. Bilal DEMİREL

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Mustafa Serdar ÖNSES

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca fikirleriyle ışık tutan, bilimsel katkılarıyla ve farklı yaklaşımlarıyla çözümler sunan, manevi desteğini her zaman hissettiren sayın hocam Prof. Dr. Bilal DEMİREL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Akademik hayatım boyunca fikir ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Sezen AKSÖZ'e çalışmalarımı yaparken sağladığı imkân, ilgi, özen ve yardımları için teşekkürlerimi sunarım. Görüş ve önerilerini samimiyetle dile getiren sayın hocalarım Doç. Dr. Şengül DANIŞMAN ve Dr. Öğr. Üyesi Esen DAĞAŞAN BULUCU'ya değerli katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FDK-2020-10546) ve YÖK 100/2000 Doktora programı Mikro ve Nanoteknoloji (2017) alt alanında bursiyer olduğum için YÖK'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince beni sabırla bekleyen canım kızım Minel ve değerli eşim Muhammet Ali ESENER'e, maddi manevi yardımlarından ve desteklerinden dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarım boyunca desteğini esirgemedi her an yardıma koşan kardeşim Birsener ATA'ya ve akademik hayatım boyunca manevi desteklerini her zaman hissettiren canım aileme çok teşekkür ederim.

Pınar ATA ESENER

Haziran 2023, KAYSERİ

MİKROELEKTRONİK DEVRELERDE KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMLARININ ISIL, ELEKTRİKSEL, MEKANİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Pınar ATA ESENER

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Haziran 2023
Danışman: Prof. Dr. Bilal DEMİREL**

ÖZET

Kalay (Sn)-kurşun (Pb) lehim alaşımları, kurşunun insan ve çevre sağlığını tehdit etmesi nedeniyle başta elektronik olmak üzere farklı lehimleme alanlarına uyum sağlamak için Sn-Pb'nin yerini alabilecek alaşım arayışları artarak devam etmektedir. Birleşim yerlerinde lehimler termal ve elektriksel özellikler açısından ne kadar iyiye devre performansı da o kadar iyidir.

Bu çalışmada, Sn-9Zn-4Bi alaşımına ağırlıkça %0.5-2 oranında antimon (Sb) ve ağırlıkça %0.5-1.5 oranında indiyum (In) ilavesiyle kurşunsuz lehim alaşımları üretilmiştir. Daha sonra bu alaşımların lineer ısı akış yöntemiyle ısıl iletkenlik; dört nokta prob yöntemiyle elektriksel iletkenlik; diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ile erime davranışları, entalpi, ısı kapasitesi; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı görüntüleri; SEM-EDX ile fazların kimyasal bileşim analizleri; X-ışını difraksiyonu (XRD) ile kristal sistemler, örgü parametreleri, Miller indisleri belirlenmiştir. Bununla birlikte Wiedemann-Franz yasası kullanılarak ısıl iletkenliğe elektron ve fonon katkıları hesaplanmıştır. Üretilen lehim alaşımları mikroelektronik devrelerde kullanım kolaylığı sağlamak amacıyla kriyojenik öğütme ile toz haline getirilmiş ve taneciklerin boyut analizi yapılmıştır. Ayrıca mekanik özelliklerden mikrosertlik ve çekme-dayanım deneyleriyle lehim alaşımlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kurşunsuz lehim alaşımı, ısıl iletkenlik, elektriksel iletkenlik, mikroyapı, Wiedemann-Franz yasası, mikrosertlik, çekme-dayanım, tanecik boyut analizi.

INVESTIGATION OF THE THERMAL, ELECTRICAL, MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF LEAD-FREE SOLDER ALLOYS IN MICROELECTRONIC CIRCUITS

Pınar ATA ESENER

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph. D. Thesis, June 2023

Supervisor: Prof. Dr. Bilal DEMİREL

ABSTRACT

Tin (Sn)-lead (Pb) solder alloys are increasingly sought for alloys that can replace Sn-Pb in order to adapt to different soldering areas, especially electronics since lead threatens human and environmental health. The better the solder in terms of thermal and electrical properties, the better the circuit performance.

In this study, lead-free solder alloys were produced by adding 0.5-2 mass percent (wt.%) antimony (Sb) and 0.5-1.5 mass percent (wt.%) indium (In) to the Sn-9Zn-4Bi alloy. Then, the thermal conductivity of these alloys by linear heat flow method; electrical conductivity by the four-point probe method; melting behaviors, enthalpy, heat capacity with differential scanning calorimetry (DSC); microstructure images by scanning electron microscope (SEM); Chemical composition analysis of phases with SEM-EDX; Crystal systems, lattice parameters, Miller indices were determined by X-ray diffraction (XRD). In addition, electron and phonon contributions to thermal conductivity were calculated using the Wiedemann-Franz law. Produced solder alloys were powdered by cryogenic grinding to provide ease of use in microelectronic circuits and the size analysis of the particles was made. In addition, the changes in the brazing alloys with the microhardness and tensile strength tests, which are the mechanical properties, were investigated.

Keywords: Lead-free solder alloy, thermal conductivity, electrical conductivity, microstructure, Wiedemann-Franz law, microhardness, tensile strength, particle size analysis.

İÇİNDEKİLER

MİKROELEKTRONİK DEVRELERDE KURŞUNSUZ LEHİM ALAŞIMLARININ ISIL, ELEKTRİKSEL, MEKANİK VE YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xiii
TABLolar LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvi
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Termal Özellikler	4
1.1.1. Isı	4
1.1.2. Sıcaklık.....	4
1.1.3. Isı Transferi	5
1.1.4. Isı Kapasitesi (Isı Sığası).....	6

1.1.4.1.	Fonon Isı Sığası	7
1.1.4.2.	Klasik Model (Dulong-Petit)	7
1.1.4.3.	Einstein Modeli	8
1.1.4.4.	Debye Modeli.....	10
1.1.5.	Termal Genleşme	14
1.1.6.	Termal Direnç	15
1.2.	Isıl İletkenlik.....	15
1.2.1.	Isıl İletkenlik Ölçüm Metotları	18
1.2.1.1.	Kararlı Hal Metotları	18
1.2.1.1.1.	Lineer Isı Akış Metot.....	19
1.2.1.1.1.1.	Mutlak Metot	19
1.2.1.1.1.1.1.	Çubuk (Rod) Metot	19
1.2.1.1.1.1.2.	Levha (Disk) Metot.....	21
1.2.1.1.1.2.	Karşılaştırmalı Metot.....	21
1.2.1.1.1.2.1.	Bölünmüş Çubuk Metot.....	22
1.2.1.1.1.2.2.	Levha (Disk) Metot.....	22
1.2.1.1.1.2.3.	Bileşik Metot	23
1.3.	Elektriksel Özellikler	23
1.3.1.	Ohm Kanunu	23
1.3.2.	Elektriksel İletkenlik.....	24
1.3.3.	Termoelektrik Olaylar.....	24
1.3.3.1.	Seebeck Olayı	25
1.3.3.2.	Peltier Etkisi	26
1.3.4.	Katılarda Elektron Enerji Bant Yapıları.....	28
1.3.5.	Bant ve Atomik Bağ Modeline Göre İletkenlik	30
1.3.5.1.	Metaller.....	30
1.3.5.2.	Yalıtkanlar ve Yarı İletkenler	30

1.3.6.	Metallerin Elektriksel Öz Direnci.....	31
1.4.	Mekanik Özellikler	31
1.4.1.	Sertlik Ölçme Deneyi	31
1.4.1.1.	Brinell Sertlik Ölçme Deneyi	32
1.4.1.2.	Rockwell Sertlik Ölçme Deneyi	32
1.4.1.3.	Knoop Sertlik Ölçme Deneyi	33
1.4.1.4.	Vickers Sertlik Ölçme Deneyi.....	33
1.4.2.	Çekme Deneyi.....	34
1.5.	Faz Diyagramları	37
1.5.1.	İkili Faz Diyagramı	37
1.5.2.	Üçlü Faz Diyagramı	39
1.6.	X-ışını Toz Kırınımı.....	41
1.7.	Lehimler	43
1.8.	Sn-Zn Alaşımları.....	44

2. BÖLÜM

YÖNTEM ve MATERYAL

2.1.	Isıl İletkenliğin Tayininde Kullanılan Deneysel Sistemler	49
2.1.1.	Kül Fırını	49
2.1.2.	Lineer Isı Akış Sistemi.....	50
2.1.2.1.	Isıtıcı Sistem	50
2.1.2.2.	Soğutucu Sistem	53
2.1.2.3.	Numune Tutucu	56
2.2.	Elektriksel İletkenliğin Tayininde Kullanılan Deneysel Sistemler.....	57
2.3.	Entalpi, Isı Kapasitesi ve Erime Davranışlarının Belirlenmesi	59
2.4.	Metalografik İşlemler	60
2.4.1.	Numunelerin Kesilmesi ve Kalıplanması.....	60

2.4.2.	Numunelerin Zımparalanması ve Parlatılması	61
2.4.3.	Numunelerin Dağlanması.....	63
2.5.	Mikroyapı İncelemesi	63
2.5.1.	Optik Mikroskopla İnceleme	64
2.5.2.	Taramalı Elektron Mikroskobu ile İnceleme (SEM).....	64
2.6.	X-Işımları Toz Difraktometresi (XRD)	65
2.7.	Öğütme İşlemi	67
2.8.	Parçacık Boyut Ölçümü.....	69
2.9.	Mekanik Özelliklerin Tayininde Kullanılan Deneysel Sistemler.....	70
2.9.1.	Mikrosertlik Değerlerinin Belirlenmesi	70
2.9.2.	Çekme-Dayanım Değerlerinin Belirlenmesi.....	71
2.10.	Isıl İletkenliğin Ölçümü için Bir Deneyin Yapılışı	71
2.10.1.	Numune Kalıbının Hazırlanması.....	71
2.10.2.	Alaşımın Oluşturulması.....	74
2.10.2.1.	Döküm Hesabı.....	74
2.10.2.2.	Dökümün Yapılması.....	76
2.10.3.	Numunelerin Lineer Isı Akış Sistemine Yerleştirilmesi	77
2.11.	Elektriksel Özdirenc/İletkenlik Değerlerinin Ölçümü için Bir Deneyin Yapılışı.....	81

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1.	Alaşımın Erime Davranışlarının ve Termal Özelliklerinin Belirlenmesi..	84
3.2.	Alaşımın Isıl İletkenliğinin Ölçümü	89
3.3.	Alaşımın Elektriksel İletkenliğinin Ölçümü	97
3.4.	Alaşımın Isıl İletkenliğine Elektron ve Fonon Katkısının Belirlenmesi	102
3.5.	Alaşımın Mikroyapılarının Tayini.....	107

3.6.	Alaşımların XRD Ölçümleri.....	116
3.7.	Alaşımların Parçacık Boyutunun Ölçülmesi	124
3.8.	Alaşımların Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi	127
3.9.	Alaşımların Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi	129
3.10.	Maliyet Hesabı.....	131

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1.	Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması	132
4.1.1.	Erime Davranışları ve Termal Özellikler	132
4.1.2.	Isıl İletkenlik.....	134
4.1.3.	Elektriksel İletkenlik.....	135
4.1.4.	Isıl İletkenliğe Elektron ve Fonon Katkısı	136
4.1.5.	Mikroyapı	137
4.1.6.	XRD	137
4.1.7.	Tane Boyutu.....	138
4.1.8.	Mikrosertlik.....	139
4.1.9.	Çekme-Dayanım.....	139

KAYNAKÇA	141
----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ.....	154
---------------	-----

KISALTMALAR

ağ.	: Ağırlık olarak
J	: Joule
°C	: Celcius
°F	: Fahrenayt
K	: Kelvin
T	: Sıcaklık
C	: Isı kapasitesi
E	: Sistemin iç enerjisi
k_B	: Boltzmann sabiti
N_A	: Avagadro sayısı
n	: Atom sayısı
$\hbar$	: Planck sabiti
ω_E	: Einstein frekansı
Θ_D	: Debye sıcaklığı
K	: Isıl iletkenlik katsayısı
J_Q	: Akım yoğunluğu
V	: Potansiyel fark
I	: Elektrik akımı
R	: Elektrik direnci
ρ	: Elektriksel öz direnç
J	: Akım yoğunluğu
$\mathcal{E}$	: Elektrik alan şiddeti
ΔT	: Sıcaklık farkı
ΔV	: Potansiyel fark
E_F	: Fermi enerjisi
BSD	: Brinell sertlik ölçme deneyi
RSD	: Rockwell sertlik ölçme deneyi
KSD	: Knoop sertlik ölçme deneyi
VSD	: Vickers sertlik ölçme deneyi
P	: Çekme kuvveti

In	: Indiyum
Bi	: Bizmut
Zn	: Çinko
Sb	: Antimon
Sn	: Kalay
mm	: Milimetre
mL	: Mililitre
g	: Gram
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
EDX	: Enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetri
XRD	: X-Işınları Difraktometresi
K_{toplam}	: Toplam ısı iletkenlik
K_e	: Isı iletkenliğine elektron katkısı
K_f	: Isı iletkenliğine fonon katkısı
σ	: Elektriksel iletkenlik
α_E	: Elektriksel iletkenlik sıcaklık katsayısı
α_T	: Isı iletkenlik sıcaklık katsayısı
T_0	: Set referans sıcaklığı
G	: Geometrik düzeltme katsayısı
S	: Proplar arası mesafe
T	: Numune kalınlığı
D	: Numune çapı
Q	: Güç girişi
ΔX	: Ölçüm noktaları arasındaki fark
H	: Entalpi
T_s	: Solidüs sıcaklığı
T_M	: Pik sıcaklığı
T_L	: Likidüs sıcaklığı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Bazı malzemelerin Debye sıcaklıkları	14
Tablo 1.2. Bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki ısı iletkenlikleri	16
Tablo 1.3. Bazı termal çiftlerin özellikleri	26
Tablo 1.4. Bazı lehim alaşımlarının termal, elektriksel ve mekanik özellikleri.....	48
Tablo 2.1. Alaşımların yüzde hacimsel oranları.....	75
Tablo 3.1. Seçilen lehim alaşımlarının erime davranışları ve termal özellikleri.....	87
Tablo 3.2. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) alaşımlarının ısı iletkenlik ölçümünün deneysel verileri	91
Tablo 3.3. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının ısı iletkenlik ölçümünün deneysel verileri	92
Tablo 3.4 Seçilen kurşunsuz lehim alaşımları için katı fazların erime sıcaklığında elektriksel ve termal özellikleri.....	106
Tablo 3.5. Sn-9Zn-4Bi ve Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5, 2) lehim alaşımlarının XRD analiz sonuçları.....	123
Tablo 3.6. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0.5, 1, 1.5) lehim alaşımlarının XRD analiz sonuçları..	124
Tablo 3.7. Seçilen kurşunsuz lehim alaşımlarının bazı mekanik özellikleri.	130
Tablo 3.8. Kg başına lehim alaşımlarının maliyeti.....	131

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Birbiriyle temas halinde olan Cu ve Fe metallерinden yapılmış termal çiftin şematik gösterimi	26
Şekil 1.2.	Termoelektrik soğutma cihazları (a) ana düzenlemesi (b) p ve n tipi yarı iletkenleriyle metali kullanan verimli bir cihaz.....	27
Şekil 1.3.	Katılarda 0 K'de (a) metallерde bant yapıları (b) metallерde, dolu valans bandı ile boş iletim bandının üst üste binmesi (c) yalıtkanların elektron bant yapı özelliği (d) yarı iletkenlerin elektron bant yapıları	29
Şekil 1.4.	Vickers sertlik ölçümünün şematik olarak gösterilmesi	33
Şekil 1.5.	Gerilme-% uzama diyagramı	36
Şekil 1.6.	İkili ötektik faz diyagramı.....	39
Şekil 1.7.	Üçlü faz diyagramı.....	40
Şekil 1.8.	Ölçekli üçlü faz diyagramı.....	40
Şekil 1.9.	A-B-C üçlü ötektik sistemin iki boyutlu faz diyagramı.....	41
Şekil 1.10.	Bragg yasası	42
Şekil 2.1.	Kül fırını	50
Şekil 2.2.	Isıtıcı sistemin şematik gösterimi ve fotoğrafı.....	51
Şekil 2.3.	Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcı (b) alt ısıtıcı kısımları	52
Şekil 2.4.	(a) Soğutucu sistemin genel görünümü (b) soğutucu bloğun şematik gösterimi (c) soğutucu sistemin fotoğrafı.....	54
Şekil 2.5.	Soğutucu-ısıtıcı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü ve fotoğrafı.	55
Şekil 2.6.	Numune tutucusunun şematik gösterimi ve fotoğrafı.....	56
Şekil 2.7.	Dört nokta prob yöntemi elektriksel iletkenlik temel elemanları	57
Şekil 2.8.	t kesitli numunenin dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği	58
Şekil 2.9.	Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı.....	60
Şekil 2.10.	Hassas kesme cihazı ve elmas kesici	61
Şekil 2.11.	(a) Dökümü sonrası numuneler (b) epoksi-resin ile kalıplanmış olan numuneler.....	61
Şekil 2.12.	Zımparalama-parlatma cihazı	62
Şekil 2.13.	Optik mikroskop görüntü sistemi	64
Şekil 2.14.	Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) fotoğrafı	65

Şekil 2.15. XRD sisteminin fotoğrafı.....	66
Şekil 2.16. XRD sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan X'Pert HighScore Plus programından alınan fotoğraf.....	66
Şekil 2.17. Kriyojenik öğütücü fotoğrafı	67
Şekil 2.18. Öğütme şişesi seti	68
Şekil 2.19. Öğütme sonrası çelik üzerinde kalan toz parçacıkları	68
Şekil 2.20. (a) Öğütme işlemi öncesi alaşım (b) öğütme işlemi sonrası toz alaşım.....	69
Şekil 2.21. Mikrosertlik ölçüm cihazı	70
Şekil 2.22. Çekme-dayanımı test ölçüm cihazının fotoğrafı.....	71
Şekil 2.23. Masaüstü torna tezgâhı	72
Şekil 2.24. Pota, huni ve numune kalıbının fotoğrafı	73
Şekil 2.25. Oksijen kaynağı yardımıyla alümina tüpün kapatılması.....	74
Şekil 2.26. Isıl iletkenlik numune kalıbının (a) fotoğrafı (b) şematik gösterimi.....	75
Şekil 2.27. Grafit pota ve saf metaller	76
Şekil 2.28. Numune potasının şematik gösterimi.....	77
Şekil 2.29. Numunelerin ölçümünde kullanılan termal çiftler.	78
Şekil 2.30. Sıcaklık kaydedici.....	79
Şekil 2.31. Lineer ısı akış sisteminin genel görünüşü.....	80
Şekil 2.32. Elektriksel öz direnç/iletkenlik ölçüm düzeneği.....	81
Şekil 2.33. Elektriksel öz direnç/iletkenlik numune tutucusu.....	82
Şekil 3.1. Deneysel çalışma sistematığı.	83
Şekil 3.2. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) alaşımlarının ısı akışının sıcaklıkla değişimi	85
Şekil 3.3. Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x=0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının ısı akışının sıcaklıkla değişimi.	86
Şekil 3.4. (a) Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) (b) Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x=0, 0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının çakışık DSC eğrileri.	88
Şekil 3.5. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) alaşımlarının saf Sn, saf Zn, saf Bi ve saf Sb ile ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.....	93
Şekil 3.6. Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x=0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının saf Sn, saf Zn, saf Bi ve saf In ile ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi	94
Şekil 3.7. Sn-9Zn-4Bi alaşımına (a) Sb (b) In katkısının saf Sn, saf Zn, saf Bi, saf Sb ve saf In metallerinin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla olan değişimi	95

Şekil 3.8. Alaşımların ısı iletkenliklerinin (a) Sb içeriğine (b) In içeriğine ve sıcaklığa bağılı değişimi	96
Şekil 3.9. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) alaşımlarının saf Sn, saf Zn, saf Bi ve saf Sb ile elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi	98
Şekil 3.10. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x= 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının saf Sn, saf Zn, saf Bi ve saf In ile elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.....	99
Şekil 3.11. Sn-9Zn-4Bi alaşımına (a) Sb katkısının ve (b) In katkısının saf Sn, saf Zn, saf Bi, saf Sb ve saf In metallerinin elektriksel iletkenliklerinin sıcaklıkla olan değişimi.....	100
Şekil 3.12. Alaşımların elektriksel iletkenliklerinin (a) Sb içeriğine (b) In içeriğine ve sıcaklığa bağılı değişimi	101
Şekil 3.13. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) lehim alaşımları için ısı iletkenliğe fonon ve elektron katkısının sıcaklıkla değişimi	104
Şekil 3.14. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0.5, 1, 1.5) lehim alaşımları için ısı iletkenliğe fonon ve elektron katkısının sıcaklıkla değişimi	105
Şekil 3.15. Sn-9Zn-4Bi alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).	108
Şekil 3.16. Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).	109
Şekil 3.17. Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).	110
Şekil 3.18. Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).	111
Şekil 3.19. Sn-9Zn-4Bi-2Sb alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).	112
Şekil 3.20. Sn-9Zn-4Bi-0.5In alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).	113
Şekil 3.21. Sn-9Zn-4Bi-1In alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).	114
Şekil 3.22. Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).	115
Şekil 3.23. Sn-9Zn-4Bi lehim alaşımının XRD sonuçları.....	116
Şekil 3.24. Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb lehim alaşımının XRD sonuçları	117

Şekil 3.25. Sn-9Zn-4Bi-1Sb lehim alaşımlarının XRD sonuçları	117
Şekil 3.26. Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb lehim alaşımlarının XRD sonuçları	118
Şekil 3.27. Sn-9Zn-4Bi-2Sb lehim alaşımlarının XRD sonuçları	119
Şekil 3.28. (a) Sn-9Zn-4Bi (b) Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb (c) Sn-9Zn-4Bi-1Sb (c) Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb (d) Sn-9Zn-4Bi-2Sb lehim alaşımlarının XRD desenleri	119
Şekil 3.29. Sn-9Zn-4Bi-0.5In lehim alaşımlarının XRD sonuçları	120
Şekil 3.30. Sn-9Zn-4Bi-1In lehim alaşımlarının XRD sonuçları	121
Şekil 3.31. Sn-9Zn-4Bi-1.5In lehim alaşımlarının XRD sonuçları	121
Şekil 3.32. (a) Sn-9Zn-4Bi (b) Sn-9Zn-4Bi-0.5In (c) Sn-9Zn-4Bi-1In (d) Sn-9Zn-4Bi-1.5In lehim alaşımlarının XRD desenleri	122
Şekil 3.33. (a) Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb ve (b) Sn-9Zn-4Bi-1Sb toz lehim alaşımlarının XRD sonuçları	125
Şekil 3.34. Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb alaşımlarının tane boyutu dağılımı	126
Şekil 3.35. Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımlarının tane boyutu dağılımı	126
Şekil 3.36. Optik mikroskop yardımıyla çekilen mikrosertlik iz fotoğrafı	127
Şekil 3.37. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) alaşımlarının mikrosertlik değişimleri	128
Şekil 3.38. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının mikrosertlik değişimleri	128
Şekil 3.39. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) alaşımlarının gerilme-uzama diyagramı	129
Şekil 3.40. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının gerilme-uzama diyagramı	130

GİRİŞ

Lehimler, elementlerin erime sıcaklığından daha düşük erime sıcaklığına sahip ötektik alaşımlardan tercih edilen dolgu metalidir. Elektronik malzeme dünyasında lehim, parçaların montajında ve birbirine bağlanmasında çok önemli bir rol oynar. Bir birleştirme malzemesi olarak lehim, elektronik topluluklarda elektriksel, termal ve mekanik süreklilik sağlar. Lehimin performansı ve kalitesi, bir lehim bağlantısının bütünlüğü için çok önemlidir ve bu da düzeneğin genel işleyişi için hayati önem taşır.

Günümüze kadar mikroelettronik düzeneklerde ara bağlantı için Sn-Pb lehimleri kullanılmıştır. Sn-Pb alaşımı iyi termal ve elektriksel özelliklerinin yanında maliyet açısından da uygun bir lehim alaşımıdır. Kurşunun ucuz olması da tedarikçilerin tercih etme sebeplerinin başında gelmektedir. Pb'nin doğal toksisitesi nedeniyle insana ve çevreye verdiği zarar oldukça fazladır. Dünya çapında, özellikle Avrupa ve Japonya'da ortaya çıkan çevresel düzenlemeler, elektronik düzeneklerde Pb kullanımının ortadan kaldırılmasını hedeflemiştir. Avrupa Konseyi tarafından 2003 yılında kabul edilen Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması (RoHS) adındaki direktifle kurşun, kadmiyum, cıva, bromür gibi zararlı maddelerin ve bileşenlerinin insan sağlığına verdiği zarar nedeniyle elektronik ürünlerde kullanımı yasaklanmıştır [1]. Bu yönetmelik Türkiye de ise 2008 yılında yürürlüğe girmiştir.

Çip ölçekli paketlenme teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla lehim bağlantılarının kullanımı artış göstermiştir. Elektronik uygulamalarda ısı ve elektriksel iletkenlik, termal özellikler gibi birçok alanda iyi özelliklere sahip olan Sn-Pb lehim alaşımı yerini yeni alaşımlara bırakmaktadır. Bu durum mikroelettronik devrelerin montajında “Pb içermeyen” lehimlerin araştırılmasını önemli bir konu haline getirmiştir. Pb içermeyen alaşımların arayışında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Bunlar; üretim (maliyet, bulunabilirlik, ısılatma) ve performanstır (mekanik, termal, elektriksel, yapısal özellikler). Fakat bunların yanında alaşım seçimini etkileyen ana faktör, alaşımın erime noktasıdır.

Çünkü montaj ve bağlantı noktası olarak kullanılacak olan lehim alaşımının diğer malzemeler üzerinde etkisi olacaktır [2]. Lehim alaşımı seçerken tüm bu hususlar göz önünde bulundurulmalıdır.

SnPb lehimine iki önde gelen alternatif olan SnAgCu ve SnCu ötektiği; Avrupa, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki birçok akademi ve endüstri kuruluşu tarafından kabul edilmektedir. Ancak SnAgCu alaşımlarında bulunan gümüş miktarı üretim maliyetini arttırdığından ısı, elektriksel ve mekanik özellikleri iyi olan kurşunsuz alternatif lehim alaşımları arayışları devam etmektedir [3].

Lehim alaşımlarının ısı ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi, malzemenin kullanılacağı uygulama alanındaki performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle elektronik uygulamalarda hasarlı bir bölgeyi iyileştirmek için kullanılan lehim bağlantıları devrenin performansını düşürmemelidir. Bu sebeplerden dolayı lehim alaşımını oluşturacak metaller iyi seçilmelidir. Bazı elementler kurşunsuz lehim alaşımlarında önemli bir rol oynar. Kalay (Sn), iyi ıslanabilirliği nedeniyle lehimlerdeki temel alaşım metalidir. Çinko (Zn) metali, yüksek aktivitesi nedeniyle zayıf ıslanabilirliğe ve korozyon direncine sahiptir. Sn-Zn alaşımlarının özelliklerini geliştirmek ve iyileştirmek için birçok çalışma yapılmıştır [4, 5]. Bizmut (Bi) metali, düşük ergime sıcaklığı, yüksek çekme dayanımı ve sertliği ile lehimleme alaşımlarında önemli gelişmeler yaratmıştır [6, 7]. Birçok çalışma, Bi elementlerinin küçük miktarlarda eklenmesinin lehim alaşımlarının yayılma ve ıslanma kabiliyetini geliştirdiğini göstermiştir [8-12]. Sn-Zn-Bi lehim alaşımları, dizüstü ve masaüstü bilgisayarlar, yazıcılar, TV tarayıcıları, elektronik sözlükler vb. birçok üründe yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Lehim alaşımlarında bir diğer katkı metali olarak kullanılan indiyum (In), düşük erime sıcaklığı nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak yüksek oranlarda kullanımı alaşımların mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere neden olur. Bu çalışmada bir diğer katkı metali olarak kullanılan antimon (Sb) ise mekanik özellikleri artırıcı özelliğe sahiptir [6, 7]. Sn-Zn ötektik alaşımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır [4, 13, 14]. Ötektik Sn-9Zn lehim alaşımı, düşük erime sıcaklığı (198.5 °C), makul ısı iletkenliği (oda sıcaklığında 35.74±4.65 W/mK) [15], düşük maliyeti ve iyi mekanik özellikleri [16] ile büyük ilgi görmektedir.

Bu çalışmada Sn-9Zn-4Bi alaşımına farklı oranlarda Sb ve In metalleri ilave edilerek alternatif kurşunsuz lehim alaşımları üretilmiştir. Literatürde Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb

ve In ilavesinin ısı ve elektriksel özelliklerinde meydana gelen değişimlerle ilgili çalışmalara rastlanmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada Sn-9Zn-4Bi alaşımına farklı oranlarda Sb ve In ilavesi yapılarak 313-433 K sıcaklık aralığında ısı ve elektriksel iletkenliğin değişimi incelenmiştir. Isı ve elektriksel iletkenlik verileri kullanılarak her bir lehim alaşımının artan sıcaklıkla birlikte ısı iletkenliğine elektron-fonon katkıları hesaplanmıştır. Bununla birlikte üretilen alaşımlardan kesitler alınarak DSC, SEM-EDX, XRD, mikrosertlik ve çekme-dayanım değişimleri üzerine farklı oranlardaki Sb ve In katkısının etkileri incelenmiş ve tartışılmıştır. Ayrıca üretilen alaşımlar arasından iki lehim alaşımı toz haline getirilerek taneciklerin boyut analizleri tespit edilmiş ve mikroelektronik uygulamalar için uygunluğu yorumlanarak önerilerde bulunulmuştur.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Termal Özellikler

1.1.1. Isı

Isı, enerji türü olmakla birlikte diğer enerji türlerine dönüşebilmektedir. Isı, kalorimetre kabı ile ölçülür. Enerji, iş ve ısı aynı birime sahiptir. SI birimi “*Joule*”dür. Artık kullanılmayan termomekanik kalori (*cal*) ile *Joule* arasında $1\text{ cal} = 4.184\text{ J}$ ve $1\text{ J} = 0.239$ ilişkisi vardır.

18. yy’ın sonlarına kadar ısı, kalori adı verilen görünmez bir sıvı olarak kabul edilmiştir. Bir malzemenin sıcak olan parçasının soğuk olanından daha fazla kalori içerdiğine inanılmıştır. Bir maddeye kalori verilirse daha sıcak olacağı ileri sürülmüştür. 1800’lü yılların ortalarında Helmholtz, Mayer ve Joule birbirlerinden bağımsız bir şekilde ısıнын sadece bir enerji türü olduğunu keşfetmişlerdir. Sıcaklıkları farklı olan iki madde temas ettirildiğinde termal enerjinin sıcaktan soğuğa doğru hareket ettiğini fark etmişlerdir. Sıcaklıktaki bir artış, mekanik (sürtünme), elektrik (dirençli ısıtma), radyasyon veya doğrudan temas gibi çeşitli yollarla elde edilebilir [17].

1.1.2. Sıcaklık

Bir maddeye dokunduğumuzda, onun "sıcak" veya "soğuk" olduğu kolaylıkla hissedilir. Sıcaklıkları farklı iki suyu bir kaba koyup beklersek sıcaklıkları eşit olur.

Sıcaklık, termodinamik dengenin nicel ölçüsüdür. Birbirinden farklı iki nesne dış ortamdan yalıtılarak birbirleriyle temas ettirildiğinde, bu iki nesne, termodinamik dengeye ulaştıklarında eşit sıcaklıklara sahip olacaktır. Kısaca sıcaklık, bir sistemi oluşturan moleküllerin ortalama kinetik enerjisinin bir ölçüsüdür.

Bir maddenin sıcaklığı değişirse, niceliklerinden biri de değişir. Örneğin, ısıtılmış bir demir çubuk genişler. Isıtılmış bir gazın basıncı artar ve ısıtılmış olan bir telin elektrik direnci de artar. Bu değişiklikler, sıcaklığı ölçmeye ve bunun için bir birim tanımlamaya yardımcı olur. Sıcaklığı ölçmek için kullanılan alet termometredir. En yaygın olarak kullanılan cıva termometresidir. Sıcaklık tayini için genellikle suyun kaynama ve donma noktası dikkate alınır. Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit (F) ve Kelvin (K) ölçekleri kullanılmaktadır. Çoğu ülkede günlük hayatta genellikle sıcaklık birimi olarak $^{\circ}\text{C}$, İngiltere’de $^{\circ}\text{F}$, bilimsel çalışmalarda ve teknikte ise K tercih edilmektedir [18].

1.1.3. Isı Transferi

Isı transferi, sıcaklık farkı diye adlandırılan itici gücün bir sonucu olarak meydana gelen enerjinin dönüşümüdür. İletim (kondüksiyon), konveksiyon ve radyasyon olmak üzere üç iletim yolu vardır [19]. İletim de ısı: katı, sıvı ve gazlar aracılığıyla iletilir. Isı, komşu moleküller arasında hareket enerjisinin transferi ile gerçekleştirilir. Katılarda enerji iletimi oldukça önemli olan serbest elektronlar tarafından da aktarılabilir. Çelik dövme parçaların ısıtılması, kışın zeminin donması gibi olaylar iletim yoluyla ısı transferine örnek olarak verilebilir.

İletimde enerji, metalik katılarda oldukça önemli olan serbest elektronlar tarafından da aktarılabilir. Esas olarak iletim yoluyla ısı transferine örnekler, eşanjörlerin veya bir buzdolabının duvarlarından ısı transferi, çelik dövme parçaların ısıtılması, kışın zeminin donması vb. verilebilir.

Konveksiyon, sıvı veya gaz elementlerinin toplu olarak taşınması ve karıştırılmasıyla ısı transferini ifade eder. Akışkan bir malzemenin hareketi söz konusu olduğundan, konveksiyonla ısı transferi kısmen de olsa akışkanlar mekaniği yasalarına tabidir. Konveksiyon, akışkan içindeki sıcaklık farkı bir yoğunluk farkından kaynaklanıyorsa, buna doğal konveksiyon denir. Eğer akışkanın hareketi, bir dış kuvvetin sonucuysa, buna zorlanmış konveksiyon denir [20]. Doğal yolla ısı transferi, katı bir yüzeyin, yüzeyden farklı bir sıcaklıktaki sıvı veya gaz ile temas ettiğinde oluşur. Akışkanın ısıtma işleminden kaynaklanan yoğunluk farkları akışkanı hareket ettirmek için gerekli olan kaldırma kuvvetini sağlar. Akışkanın hareketi sonucunda serbest veya doğal taşınım gözlenir. Herhangi bir odayı ısıtmak için kullanılan sıcak bir radyatör doğal konveksiyonla ısı

transferine iyi bir örnektir. Radyatöre gelen soğuk hava ısınır ve kaldırma kuvvetleri nedeniyle doğal konveksiyonla yükselir [21].

Radyasyonla iletim, ısı olarak uyarılmış bir maddenin yüzeyinde yayılan elektromanyetik radyasyondur. Bu elektromanyetik radyasyon her yöne yayılır. Başka bir maddeye çarptığında yansır, iletilebilir ve emilebilir. Böylece ısı, aralarında bir iletim ortamına gerek duymadan bir maddeden diğerine geçebilir. Bazı durumlarda, bu enerji geçişinden etkilenmeyen hava gibi ayırıcı bir ortam olabilir. Güneşin ısısı, termal radyasyonun en belirgin örneğidir.

1.1.4. Isı Kapasitesi (Isı Sığası)

Isı kapasitesi (C), temel olarak derişim ve sıcaklığa göre değişen termodinamiksel bir özelliktir. Basit bir ifadeyle, ısı kapasitesi veya özgül ısı, sıcaklığı 1°C artırmak için gerek duyulan birim kütle başına düşen ısı miktarıdır [22]. Uluslararası Birimler Sisteminde (SI), ısı kapasitesi kelvin (K) başına joule (J) biriminde ifade edilir. $\text{kJ}/^\circ\text{C}$ birimi genellikle termal geri kazanımda kullanılır [23].

Isı kapasitesi ve sıcaklığın bağımlılığı, bir malzemenin entalpi ve entropisinin tahmin edilmesinde yardımcı olur. Isı kapasitesi aşağıda yer alan Denklem 1.1 ile verilir.

$$C = \left(\frac{\delta q}{\delta T} \right) \quad (1.1)$$

Burada δq maddeye eklenen veya maddeden çekilen sonsuz küçük bir ısı miktarıdır. dT ise sonuçta ortaya çıkan sonsuz küçük sıcaklık değişimidir. Özgül ısı geleneksel olarak adiyabatik kalorimetri teknikleri ile ölçülür [24].

Tarihsel olarak, katıların ısı kapasitesini anlamak, kuantum teorisinin en büyük erken başarılarından birisi olmuştur. Klasik istatistiksel mekanik, yalıtkanların oda sıcaklığındaki ısı kapasitesini oldukça iyi açıklamıştır. Fakat bu durum daha düşük sıcaklıklar için başarısız oldu. Hatta metaller için tamamen başarısız oldu. Birçok serbest elektron nedeniyle metallerin yalıtkanlardan çok daha yüksek bir ısı kapasitesine sahip olması bekleniyordu. Ancak bir metalin oda sıcaklığındaki ısı kapasitesinin, elektronlar yokmuş gibi bir yalıtkaninkine benzer olduğu ortaya çıktı. Isı sığasını daha iyi

anlayabilmek için örgü titreşimlerinin kuantası olan fononların ısı sığasına katkısını yakından incelemek gerekir.

1.1.4.1. Fonon Isı Sığası

Isı sığası, katı atomların titreşim hareketlerinin özelliklerini ifade eden fiziksel bir niceliktir. Bu sebeple katı içerisindeki atomların titreşim enerjileri incelenirse ısı sığaları rahatlıkla bulunabilir. Isı kapasitesi ile genellikle, deneylerin belirlediği sabit basınçtaki ısı kapasitesinden ziyade daha temel olan sabit hacimdeki ısı kapasitesi kastedilir. Sabit hacimdeki ısı kapasitesi, Denklem 1.2 ile ifade edilir.

$$C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_V \quad (1.2)$$

Burada E enerji ve T ise sıcaklık olarak tanımlanır [25].

Fononların ısı sığası öncelikle klasik model ile açıklanmıştır. Daha sonra da Einstein'ın ve Debye'nin yaklaşımları öne sürülmüştür. Bu yaklaşımların nasıl açıklandığına bakalım.

1.1.4.2. Klasik Model (Dulong-Petit)

Klasik olarak, bir katının ısı kapasitesini hesaplamak için iki farklı yaklaşım kullanabiliriz. İlgi çekici olan husus bu yaklaşımların aynı cevabı vermemeleridir. Klasik termodinamik bize sonlu sıcaklıktaki ısı kapasitesinin değeri hakkında hiçbir şey söylemez, ancak sıfır sıcaklıkta yok olması gerektiği gösterilebilir. Buna sebep olan iddia, sıfır sıcaklıkta sonlu bir entropinin gerekliliğine dayanmaktadır.

Klasik istatistiksel mekanik ise, bir katının ısı kapasitesi için eş bölme teoremi aracılığıyla sayısal bir değer hesaplama imkânı verir. Bir ısı banyosu ile temas halinde olan tek boyutlu bir harmonik osilatör için ortalama enerji Denklem 1.3 ile gösterilir.

$$\langle E \rangle = k_B T \quad (1.3)$$

Burada k_B Boltzmann sabiti, T ise sıcaklıktır. Üç boyutlu bir osilatör için enerji Denklem 1.4'deki gibi olması gerekir.

$$\langle E \rangle = 3k_B T \quad (1.4)$$

Bu, bir atom içeren bir "katı" için ısı kapasitesinin (1.4) denkleminde yola çıkarak

$$\frac{\partial E}{\partial T} = 3k_B \quad (1.5)$$

olduğunu gösterir. Denklem 1.5 de, 1 mol atom için sıcaklıktan ve malzemeden bağımsız olarak $3k_B N_A = 3R = 24.9 \text{ JK}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca Dulong-Petit kuralı denir.

Dulong-Petit modeli bakır, alüminyum, altın, kurşun, demir ve elmas gibi metallerin oda sıcaklığındaki ısı kapasiteleri ile oldukça uyumludur. Ancak ısı kapasitesinin genellikle daha küçük olduğu azotun kaynama noktasında daha az iyidir. Dolayısıyla, farklı klasik teori türleri arasında zaten bir çatışma vardır. Dulong-Petit yasası, sıcaklıktan bağımsız bir ısı kapasitesi öngörürken, klasik termodinamiğe göre ısı kapasitesinin sıfır sıcaklıkta kaybolması gerekir. Sıfır sıcaklıkta kaybolan bir ısı kapasitesi de deneysel sonuçlarla desteklenmektedir. Elmasın yüksek sıcaklıklarda, ısı kapasitesi Dulong-Petit değerine yaklaşır, ancak daha düşük sıcaklıklarda sıfıra düşer [26]. Yapılan çalışmalar düşük sıcaklıklar için ısı kapasitesinin T^3 ile azaldığını açığa çıkarmıştır [27]. Isı kapasitesinin sıcaklığa bağlı olması bu modelin yetersiz kaldığını göstermiştir. Klasik modelin açıklayamadığı kısımlar kuantum mekaniğinden faydalanılarak açıklanmıştır.

1.1.4.3. Einstein Modeli

Katıların sıcaklığa bağlı ısı kapasitesini anlamak için ilk teorik çalışma A. Einstein tarafından yapılmıştır. Einstein'ın fikri, katıdaki osilatörleri tanımlamak için kuantum mekaniğini kullanarak probleme yaklaşmaktır. Hesaplama, katının titreşimlerinin bağımsız harmoniklerle temsil edildiği varsayılarak başlar. Yani her bir atomu birbirinden bağımsız olarak salınım yaptığını düşünmüştür. Katının titreşimlerinin hepsinin aynı frekansa sahip olduğunu kabul ederek ve bu frekansın Einstein frekansı olan ω_E 'ye sahip bağımsız harmonik osilatörler tarafından temsil edilir. Böylece enerji seviyelerinin Denklem 1.6 da ifade edildiği gibi olduğunu varsayarak başlar.

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_E \quad (1.6)$$

Bu, bir osilatör için ortalama enerjinin $3N_A$ katı ile Denklem 1.7 ile aşağıdaki gibi verilir.

$$\langle E \rangle = 3N_A \left(\langle n \rangle + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_E \quad (1.7)$$

Ortalama fonon sayısı $\langle n \rangle$, kafes titreşimleri bozonik karakterde olduğundan, yani durum başına nicelik n sayısında bir sınır olmadığından Bose-Einstein dağılımı kullanılarak bulunabilir. Denklem 1.8 de bu modeldeki titreşim enerjisi

$$E = 3 \langle n \rangle N \hbar \omega_E \quad (1.8)$$

olacaktır.

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\hbar \omega_E / k_B T} - 1} \quad (1.9)$$

$3N_A$ osilatör için elde edilen enerji Denklem 1.10 ile şöyle yazılır;

$$\langle E \rangle = 3N_A \left(\frac{1}{e^{\hbar \omega_E / k_B T} - 1} + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_E \quad (1.10)$$

Bu ifade ısı kapasitesi (1.11) denkleminde yerine yazılırsa;

$$C = \frac{\partial \langle E \rangle}{\partial T} = 3R \left(\frac{\hbar \omega_E}{k_B T} \right)^2 \frac{e^{\hbar \omega_E / k_B T}}{\left(e^{\hbar \omega_E / k_B T} - 1 \right)^2} \quad (1.11)$$

olur. Yüksek sıcaklık sınırında, Einstein modeli Dulong-Petit değerini doğru bir şekilde yeniden üretir.

"Yüksek sıcaklık", sıcaklığın en az osilatörlerin titreşim frekansına karşılık gelen sıcaklık olan Einstein sıcaklığı kadar yüksek olması gerektiği anlamına gelir, yani $\Theta_E = \hbar \omega_E / k_B$ olsun. Isı kapasitesi de deneysel verilerle uyumlu olarak daha düşük sıcaklıklarda sıfıra düşer. Tek sorun, sıfıra çok hızlı düşmesidir. Düşük sıcaklıklarda, üstel bir davranış gösterirken, deney bir kuvvet yasası davranışı gösterir ($C \propto T^3$). Doğrusal sıcaklık ölçeğinde bu çok açık bir şekilde ortaya çıkmaz, ancak çift logaritma ölçeğinde sorun açıktır.

Sıcaklık sonsuza yaklaştıkça C değeri $3Nk_B$ olur ve bu deneysel sonuçlarla uyum içerisindedir. Sıcaklık sıfıra yaklaşırken C değeri Denklem (1.12),

$$C = 3Nk_B \left(\frac{\hbar \omega_E}{k_B T} \right)^2 \left(e^{-\hbar \omega_E / k_B T} \right) \quad (1.12)$$

olur [27]. Yüksek sıcaklık sınırında, termal enerji seviyeleri $\hbar \omega_E$ arasındaki boşluktan çok daha büyüktür ve problemin nicel doğası önemsiz hale gelir. Bu nedenle ısı sığası için Dulong-Petit değerini geri kazanıyoruz. Tek koşul, sıcaklığın Einstein sıcaklığından daha yüksek olması gerektirir. Bu sonuç, sıcaklık, en yüksek titreşim enerjisine karşılık gelen sıcaklıktan daha yüksek olduğu sürece, birçok farklı titreşim frekansına sahip daha karmaşık bir model için açıkça geçerli olacaktır. Yeterince düşük sıcaklıklarda, hemen hemen tüm osilatörler temel durumundadır. Sıcaklık $\hbar \omega_E$ 'den çok daha az bir miktar yükseltirise, hiçbir şey değişmez ve ısı kapasitesi esasen sıfırdır [26].

1.1.4.4. Debye Modeli

Einstein modelindeki esas sorun düşük sıcaklıktaki ısı kapasitesiydi. Isı kapasitesi çok hızlı düşüyor. Çünkü tüm Einstein osilatörleri, onları temel durumlarından çıkarmak için gerekli olan $\hbar \omega_E$ 'yi sağlamak için yeteri miktarda ısı enerji olmadığında Θ_E 'nin altında donuyor. Problem, daha düşük bir ω_E seçilerek çözülmesi olanaksız. Çünkü bu durum, Dulong-Petit rejimine geçişi de daha düşük sıcaklıklara kaydırır.

Debye, Einstein modelindeki eksiklikleri açıklayan bir model ileri sürmüştür. Debye, kafes titreşimleri için daha gerçekçi bir model kullanarak sorunun çözülebileceğini fark etti. Her katının bir akustik fonon dalına sahip olduğunu daha önce görmüştük ve bu, $k=0$ 'a yakın çok küçük enerji seviyesi aralıklarına sahip kuantum mekanik osilatörlere yol açar. Bir harmonik osilatör için enerji seviyelerinde ilk osilatör için dalga vektörü $k=2\pi/aN$ 'dir. Mikroskobik bir katı için N çok büyük olduğundan, k çok küçüktür ve $\omega(k)$ da öyledir. Bu osilatörler böylece çok düşük sıcaklıklarda bile uyarılabilir ve Einstein modelinin tüm titreşimleri "dondurma" probleminde kaçınır.

$k=0$ 'a yakın en düşük enerjili uyarılar, akustik dalın dağılımının doğrusal dağılım ile yaklaşık olduğu ses dalgalarıdır. Debye modelindeki temel varsayım, bu dağılımın tüm k değerleri için geçerli olduğudur. Bu durum daha yüksek k 'deki uyarılar için açıkça yanlıştır. Birden fazla atom içeren bir birim hücre için bu tamamen yanlıştır, çünkü optik dalların varlığını yok sayar. Ancak, bu modlar zaten düşük sıcaklıklarda uyarılmaz. Yüksek sıcaklıklarda uyarılabilirler ama bu çok da önemli değildir. Einstein modelinde,

gerçek osilatör frekanslarından bağımsız olarak yüksek sıcaklıktaki ısı kapasitesi klasik değere yaklaşır. Düşük sıcaklıklar için Debye varsayımı daha uygundur ve bu iyi sonuçlara yol açar.

Frekans ω olan bir osilatör için enerji Denklem 1.13 ile şöyle ifade edilir,

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega_E/k_BT} - 1} \quad (1.13)$$

Sıfır noktası enerjisi $\hbar\omega/2$, ısı kapasitesine katkıda bulunmadığı için ihmal edilir. Üç boyutlu bir katının tüm osilatörleri için ortalama enerji Denklem 1.14 ile şu şekilde yazılabilir:

$$\langle E \rangle = 3 \int_0^{\omega_D} \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega_E/k_BT} - 1} d\omega \quad (1.14)$$

Burada ω_D malzemedeki en yüksek fonon frekansıdır. “3” faktörü, iki farklı enine ve bir boyuna polarizasyon ω için verilen dalga polarizasyonu için üç olasılık olduğu gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Burada, her üç dalganın da $\omega = v|\mathbf{k}|$ dağılımını takip ettiğini varsayıyoruz.

Fakat iki problem var: Birincisi, diyelim ki $\omega_1 + d\omega$ frekans aralığında $\omega_2 + d\omega$ den daha çok osilatör olabilir. Bu, integralde bir ağırlık faktörü $g(\omega)$ ’yi dâhil etmeyi gerektirir. Bu faktör, açık nedenlerle durumların yoğunluğu olarak adlandırılır. İkinci problem ise, entegrasyon için üst sınır ω_D ’yi belirlememiz gerektiğidir. $g(\omega)$ ’nin dahil edildiği ortalama enerji Denklem 1.15 ile yazılır.

$$\langle E \rangle = 3 \int_0^{\omega_D} \frac{g(\omega)\hbar\omega}{e^{\hbar\omega_E/k_BT} - 1} d\omega \quad (1.15)$$

Üç boyutlu bir katı için $g(\omega)$ durumlarının yoğunluğunu hesaplayarak başlıyoruz. Bunu tek boyutta yapmak yeterli değildir. Çünkü $g(\omega)$ problemin boyutluluğuna bağlıdır. Durumların yoğunluğu $g(\omega)$, ω civarında küçük bir $d\omega$ frekans aralığındaki durum sayısıdır. Bu nedenle, bunu hesaplama stratejisi, önce belirli bir frekansın ω altındaki toplam durum sayısını bulmaktır. Buna $N(\omega)$ diyoruz ve $N(\omega)$ ’nin ω ’ye göre türevini alarak $g(\omega)$ ’yi elde ediyoruz.

Mikroskobik kenar uzunluğu L olan bir katı küpü ele alıyoruz ve periyodik sınır koşullarını kullanıyoruz. Her bir titreşim durumunun k_s , (k_x, k_y, k_z) üçlüsü veya eşdeğer olarak üçlü n_s (n_x, n_y, n_z) ile tanımlandığını düşünebiliriz. $n_{\max}$ yarıçaplı bir küre veya alternatif olarak $k_{\max}$ yarıçaplı bir küre içinde kaç tane N durum bulunduğunu bilmek istiyoruz. Bu, kürenin hacmi tarafından Denklem 1.16 ve 1.17 ile ifade edilir.

$$N = \frac{4}{3} \pi n_{\max}^3 \quad (1.16)$$

veya $k_{\max}$ cinsinden

$$N = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{L k_{\max}}{2\pi} \right)^3 \quad (1.17)$$

şeklinde yazılır. Durumların yoğunluğunu hesaplamak için, N 'yi frekansın ω fonksiyonu olarak ifade etmemiz gerekir ve bu, $\omega(k) = vk$ dağılımı kullanılarak yapılabilir (Denklem 1.18).

$$N = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{L\omega}{2\pi v} \right)^3 = \frac{V}{6\pi^2 v^3} \omega^3 \quad (1.18)$$

Şimdi Denklem 1.15 için üst integral limiti ω_D sorusunu ele almalıyız. Uyarıların doğası ne olursa olsun, integralin limiti, doğru sayıda normal mod elde edecek şekilde seçilmelidir, bu nedenle katıdaki N atomu için, Denklem 1.19 şöyle yazılır:

$$3N = 3 \int_0^{\omega_D} g(\omega) d\omega \quad (1.19)$$

(1.18)'in kullanılması ve entegrasyon sonuçlarının gerçekleştirilmesi için Denklem 1.20 halini alır.

$$\omega_D^3 = 6\pi^2 \frac{N}{V} v^3 \quad (1.20)$$

ω_D , Debye frekansı olarak adlandırılır ve karşılık gelen sıcaklık $\Theta_D = \hbar \omega_D / k_B$, Debye sıcaklığı olarak adlandırılır. (1.15) denkleminde,

$$\langle E \rangle = 3 \int_0^{\omega_D} \frac{\omega^2 V}{2\pi^2 v^3} \frac{\hbar \omega_E}{e^{\hbar \omega_E / k_B T} - 1} d\omega = \frac{3V\hbar}{2\pi^2 v^3} \int_0^{\omega_D} \frac{\omega^3}{e^{\hbar \omega_E / k_B T} - 1} d\omega \quad (1.21)$$

ve $x = \hbar \omega / k_B T$ ve $x_D = \hbar \omega_D / k_B T$ ifadesi yazılırsa Denklem 1.22 şeklinde yazılabilir.

$$\langle E \rangle = \frac{3Vk_B^4 T^4}{2\pi^2 v^3 \hbar^3} \int_0^{x_D} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = 9Nk_B T \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{x_D} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (1.22)$$

Isı kapasitesi için kesin bir denklem yazmak yerine, düşük ve yüksek sıcaklık sınırlarına yoğunlaşılır.

Yüksek sıcaklıklar da, Denklem (1.22) de x küçüktür ve integraldeki üstel fonksiyona “ $1+x$ ” ile yaklaşılabılır. Bu durumda integral sadece x^2 'nin üzerindedir ve elde edilen enerji $\langle E \rangle = 3Nk_B T$ dir. 1 mol atom için enerji $3RT$ ye eşittir. Yani bu da Dulong-Petit sonucuna yol açar. Bu elbette Einstein modelinden beklenen bir durumdur. Dulong-Petit sonucuna her zaman yeterince yüksek sıcaklıklarda ulaşılır.

Daha az belirgin olan sınır, düşük sıcaklıklar içindir. Burada x büyüktür ve x_D yerine sonsuz integral yapmak için yaklaşıklık yapılabilir. İntegralin değeri $\pi^4/15$ olur ve türevden sonra ısı kapasitesi bulunur.

$$C = \frac{12\pi^4}{5} Nk_B \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \quad (1.23)$$

Denklem 1.23 Einstein modelinin üstel davranışından çok daha iyi uyan Debye T^3 yasasıdır. Debye modelinin düşük sıcaklıklarda bu kadar iyi çalışmasının nedeni: düşük enerjilerde ve uzun dalga boylarında titreşim modlarının iyi bir tanımını sağlarken, daha yüksek enerjiler için yanlıştır. Ancak düşük sıcaklıklarda, yalnızca düşük enerji modları yine de uyarılır ve bu nedenle iyi çalışır.

Debye sıcaklığı Θ_D , Einstein modelindeki Einstein sıcaklığına benzer bir rol oynar: Bir sıcaklık ölçeği belirler. Yalnızca Debye sıcaklığının yeterince üzerindeki sıcaklıklar için Dulong-Petit yasasına uyulur. Ayrıca, Debye frekansı, doğrusal bir dağılım varsayılarak malzemenin en yüksek titreşim frekansı olarak tanımlanmıştır ve genellikle belirli bir malzemedeki titreşimlerle ilişkili maksimum frekansın veya enerjinin bir ölçüsü olarak kullanılır. Ağır atomlar ve zayıf (yani metalik) bağlar, güçlü (yani kovalent) bağlara sahip hafif atomlardan daha düşük titreşim frekanslarına yol açar [26].

Tablo 1.1. Bazı elementlerin Debye sıcaklıkları [25].

Malzeme	Debye Sıcaklığı (K)
Alüminyum	428
Gümüş	225
Altın	165
Bizmut	119
Bakır	343
Galyum	320
İndiyum	108
Kurşun	105
Antimon	211
Kalay	200
Çinko	327

1.1.5. Termal Genleşme

Bir çubuğun uzunluğu L , artan sıcaklıkla artar. Deneyler, hayli geniş bir sıcaklık aralığında, doğrusal genişlemenin (ΔL) sıcaklıktaki artışla (ΔT) orantılı olduğunu göstermiştir. Orantı sabitine α_L , lineer genişleme katsayısı olarak adlandırılır. Termal genleşme katsayısı α_L şu şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_L \Delta T \quad (1.24)$$

Burada $\Delta L/L$ katının kesirli uzunluk değişimidir ve ΔT , genellikle oda sıcaklığına göre sıcaklık değişimidir. α_L her zaman oldukça küçüktür [26].

Genleşme katsayısının molar ısı kapasitesi C_v ile orantılı olduğu bulunmuştur. Yani α_L 'nin sıcaklık bağımlılığı C_v 'nin sıcaklık bağımlılığına benzer. Sonuç olarak, dielektrik malzemeler için α_L 'nin sıcaklık bağımlılığı, Debye tarafından tahmin edilen $C_v=f(T)$ ilişkisini yakından takip eder. Spesifik olarak α_L , $T > \Theta_D$ için sabit bir değere yaklaşır ve $T \rightarrow 0$ için T^3 olarak kaybolur. Metallerin ısı (termal) genleşme katsayısı ise çok küçük

sıcaklıklarda T ile orantılı olarak azalır ve diğer sıcaklık bölgelerinde fononların ve elektronların ısı kapasitelerinin toplamına bağlıdır.

1.1.6. Termal Direnç

Termal direnç, ısı iletimine karşı gösterilen bir zorluktur. Termal direnç, ısı iletkenlik gibi yeterince yüksek sıcaklıklarda parçacıkların ortalama serbest yoluna bağlıdır. Bu sebeple de ortalama serbest yolu etkileyen faktörleri bilmek gerekir. Ortalama serbest yol: diğer fononlardan saçılma ve geometrik saçılma (safsızlık ve kusur atomlar) olayları olmak üzere iki faktöre bağlıdır. Termal dirence katkı en fazla fonon-fonon saçılmasından gelmektedir. Sıcaklığın artmasıyla fonon sayısı artar ve dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda ortalama serbest yol düşer. Serbest yolun düşmesi de termal direnci artırır.

“Fonon-fonon saçılmalarında, $\vec{K}_1 + \vec{K}_2 \rightarrow \vec{K}_3$ ($\vec{K}$ dalga vektörü) oluşturacaksa, yani iki fonon etkileşip üçüncü bir fonon oluşturursa, diğer bir deyişle momentum korunursa malzemede net bir fonon akışı gerçekleşir. Yazdığımız son ifadenin tamamını $\hbar$ ile çarparsak; $\hbar \vec{K}_1 + \hbar \vec{K}_2 = \hbar \vec{K}_3$ ($P_1 + P_2 = P_3$) olur. Bu Fonon-fonon etkileşimlerinde şekilde momentumun korunduğu olaylara *Normal olaylar* veya *N-etkileri* denir.” [27].

Termal direnç mekanizması *Umklapp etkileri* olarak adlandırılır. İki fonon etkileşime girdiğinde oluşan üçüncü bir fonon bu iki fononun toplamına eşit olmaz ve dolayısıyla da momentum korunamaz. Momentumun korunabilmesi için bir $\vec{G}$ ters örgü vektörüne ihtiyaç vardır. Yani; $\hbar \vec{K}_1 + \hbar \vec{K}_2 = \hbar \vec{K}'_3 + \hbar \vec{G}$ olur.

Umklapp kaydırma anlamına gelir ve Peierls tarafından izah edilmiştir. Sadece birinci Brillouin bölgesi içinde momentum değerleri anlamlıdır.

1.2. Isıl İletkenlik

Isı iletimi, iki cisim birbirine temas ettirildiğinde, sıcak cisimden soğuk cisme termal enerjinin aktarılmasıdır. Uçları farklı sıcaklıklarda olan x uzunluğunda çubuk şeklindeki bir malzemeyi düşünelim. Çubuğun zamana ve alana (ısı akısı) bölünen bir kesitinden geçen ısı, sıcaklık gradyanı dT/dx ile orantılıdır. Orantı sabiti, ısı (termal) iletkenlik olarak adlandırılır. K veya λ ile gösterilen ısı iletkenlik Denklem 1.25 ile ifade edilir.

$$J_Q = -K \frac{dT}{dx} \quad (1.25)$$

Burada K , ısı iletkenlik katsayısıdır ve birimi $W.m^{-1}.K^{-1}$ 'dir. J_Q , akım yoğunluğudur ve birim zamandaki birim alana iletilen termal enerjidir. Birimi ise $J.cm^{-2}.s^{-1}$ 'dir. Denklem 1.25'deki eksi işareti, ısı ının sıcaktan soğ uğa doğru aktığını gösterir [17].

Tablo 1.2 de, bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki ısı iletkenlik değ erleri yer almaktadır. Metallerin genellikle yalıtkanlardan çok daha iyi ısı iletkenliğ e sahip olduklarını g ünlük deneyimlerden bilinen bir doğ rudur. Bu sebeple, serbest elektronların ısı iletkenliğ e katkılarının kafes katkısından çok daha önemli oldu ğ u düşün ülr. Fakat bu her zaman olan bir durum değ ildir. Klasik bir örnek verilirse, Tablo 1.2'den gör üldü ğ ü üzere oda sıcaklığ ında t üm malzemelerin en y üksek termal iletkenliklerinden birine sahip olan yalıtkan elmadır [26]. Isı iletkenlik, artan sıcaklıkla biraz azalır. Örneğ in, 1000 °C sıcaklık aralı ğ ında bakır için ısı iletkenlik değ eri %20 azalır. Aynı sıcaklık aralı ğ ında ise bu durum demir için %10 azalır [17].

Tablo 1.2. Bazı malzemelerin oda sıcaklığındaki ısı iletkenlikleri [17].

Malzeme	$K (Wm^{-1}K^{-1})$
Elmas, tip IIa	2.300
SiC	490
G üm ü ş	429
Bakır	401
Al ü minyum	237
Demir	80.2
Su	0.63
Hava	0.00023

Katı malzemelerde ısı; elektron, fonon, manyetik uyarıcı ve elektromanyetik radyasyon gibi çe ş itli taşı yıcılar tarafından iletilmektedir. Bu durumda toplamda ısı iletkenlik her bir taşı yıcı türünden gelen katkıdan oluş ur. Isı iletkenlik, Denklem 1.26 ile ifade edilir.

$$K = \frac{1}{3} \sum_j C_j v_j l_j \quad (1.26)$$

Burada j taşıyıcı türü, C_j birim hacim başına düşen özgül ısıya j tipindeki taşıyıcının katkısı, v_j taşıyıcının hızı, l_j ise ortalama serbest yol olarak tanımlanır [28]. Isı transferi üç yolla (kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon) gerçekleşir. Isı iletimi gazlarda konveksiyon, katılarda ise kondüksiyonla sağlanır.

Metallerde ısı hem elektron hem de fononlarla taşınabilir. Bu sebeple ısıl iletkenliği fononlardan gelen ve elektronlardan gelen katkı olmak üzere Denklem 1.27 ve 1.28 ile ifade edilebilir.

$$K_f = \frac{1}{3} \sum_f C_f v_f l_f \quad (1.27)$$

$$K_e = \frac{1}{3} \sum_e C_e v_e l_e \quad (1.28)$$

Burada C öz ısı, v parçacık hızı, l ortalama serbest yol, f taşıyıcı türü fonon ve e taşıyıcı türü ise elektrondur. Metallerde ısıl iletkenliğe elektron katkısı fononların katkısından daha büyüktür. Fononların öz ısısı elektronlarınkinin yaklaşık 100 katı kadardır. Elektronların hızı fononların hızının yaklaşık 1000 katı kadardır. Dolayısıyla $K_e > K_f$ olması, elektronların hızları ve ortalama serbest yolları göz önüne alındığında fononların hızları ve ortalama serbest yollarından daha büyük olması ile açıklanır [27]. Saf metallerde elektronlar fononlara göre daha yüksek hızda ve daha az saçılır olması sebebiyle ısıl iletkenlikleri daha yüksektir.

Seramikler serbest elektron bulundurmadıkları için ısı iletimi açısından yalıtıcıdır. Dolayısıyla seramiklerde ısı iletimine katkı elektronlardan çok fononlarla sağlanır. Seramikler içerisinde bulunan gözenekler sebebiyle pek çok yerde yalıtkan olarak kullanılmaktadır. Malzeme içerisinde bulunan gözeneklerin artışıyla ısıl iletkenlik azalır.

Polimerlerde ısı iletimi zincir yapıdaki moleküllerin titreşim ve dinme hareketleriyle sağlanır. Malzemenin kristalleşme derecesi ısıl iletkenliğin büyüklüğünü belirler. Kristal içeriği yüksek, düzenli yapıya sahip polimerlerin ısıl iletkenlikleri amorf yapıdaki polimerlere kıyasla daha yüksektir [29].

1.2.1. Isıl İletkenlik Ölçüm Metotları

Katılarda ısı iletkenliği deneysel olarak belirleyebilmek için birçok farklı ölçüm metotları vardır. Malzemenin türü ve sıcaklık aralığına göre bir metot seçilir. Her malzeme için aynı metot kullanılarak ısı iletkenlik tayin etmek mümkün değildir. Uygulanacak olan metodun uygunluğu; malzemenin fiziksel özelliği, geometrik yapısı, deneyin hızı, deneyin yapılma süresi ve gerekli olan bütçe gibi konularla belirlenir.

Isıl iletkenliği; kararlı-hal ve kararsız-hal olmak üzere iki ölçme metodu olarak sınıflandırılır. Bu tez çalışmasında kararlı-hal ısı iletkenlik ölçme metodu kullanıldığı için kararsız-hal metoduna yer verilmemiştir.

Kararlı-hal ölçümünde numune sabit bir sıcaklık altında tutulur. Isıl iletkenlik değeri sistem dengeye geldiğindeki ısı akış hızı ve sıcaklık gradyentinin belirlenmesiyle bulunur [30].

Birçok ısı iletkenlik ölçüm metodunda esas sorun kontrollü bir ısı akışının sağlanamamasıdır. Bunu sağlamak için hem teorik şartların hem de deneysel koşulların birbiriyle uyumlu olması gerekir. Eğer merkezde ısı kaynağı ve içi boş olan küre şeklinde bir numune olursa kontrollü bir şekilde ısı akışı elde edilebilir. Dâhili bir ısıtıcıyla ısı sağlanırsa numune içerisinden geçerken ısı kaybı olmadan radyal bir şekilde geçer. Ama gerçekte küre şeklinde bir ısı kaynağı ve numune oluşturmak hiç kolay değildir. Dolayısıyla ısı akışının ve sıcaklık gradyentinin ölçülmesi de bir o kadar zordur [30].

1.2.1.1. Kararlı Hal Metotları

Katıların ısı iletkenliklerini ölçmek için kullanılan kararlı hal metotları aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

A. Lineer Isı Akış Metot

a. Mutlak Metot

1. Çubuk (Rod) Metot

2. Levha (Disk) Metot

b. Karşılaştırmalı Metot

1. Bölünmüş Çubuk Metot

2. Levha (Disk) Metot

3. Bileşik Metot

Lineer ısı akışı metodunda mutlak ve karşılaştırmalı metot arasında ısı akışının ölçüm şekline göre bir fark vardır. Mutlak metotta, malzemenin ucunda yer alan ısıtıcıdan elektriksel güç girdisi ölçülerek numunede meydana gelen ısı akış oranı doğrudan tayin edilir. Numunenin dışındaki ısı akışı ise akı kalorimetresi veya buharlaşma kaybı kalorimetresiyle ölçülebilir. Birinci metot da ısı akış hızı, ısı kapasitesine sahip sıvının sıcaklık artışıyla ve akış hızı aracılığıyla tespit edilir. İkinci metot da ısı akış hızı, buharlaşma ısısı bilinen bir sıvının buharlaşma ısısı vasıtasıyla belirlenir. Bahsedilen bu metotlar numunenin geometrisine göre alt başlıklara ayrılabilir [28].

1.2.1.1.1. Lineer Isı Akış Metot

Lineer yani boylamasına ısı akış metodunda deneysel sistem, ısı akışının bir çubuğun veya diskin (numune) sadece eksenel yönünde olacak şekilde dizayn edilmiştir. Malzemenin, radyal ısı kazancı veya kaybı önlenir ya da mümkün olduğu kadar en aza indirilir. Kararlı-hal şartların da radyal ısı kazancının veya kaybının olmadığı düşünülerek, ısı iletkenlik Fourier-Biot (tek boyutlu) ısı iletimi Denklem 1.29 yardımıyla elde edilir [31, 32].

$$K = \frac{-q\Delta x}{A\Delta T} \quad (1.29)$$

Burada K değeri $(1/2)(T1+T2)$ sıcaklığındaki ortalama ısı iletkenlik katsayısıdır. ΔT ; $T2-T1$, q ; ısı akış hızı, A ; numunenin kesit alanı ve Δx ; $T1$ ve $T2$ sıcaklıklarının ölçüldüğü noktalar arasındaki uzaklıktır [28].

1.2.1.1.1.1. Mutlak Metot

1.2.1.1.1.1.1. Çubuk (Rod) Metot

Mutlak metotlardan olan çubuk metodu, iyi iletkenliğe sahip malzemeler ve çok yüksek sıcaklığın dışındaki bütün sıcaklıklarda uygundur. Esasında çubuk metodu oda sıcaklığının altındaki neredeyse tüm ölçümlerde kullanılır. Sistemde kullanılan numune çubuk şeklinde olmalıdır. Bu şekilde olmasının nedeni doğru ve kesin bir ölçüm elde

edebilmek için numune boyunca fark edilebilir derecede sıcaklık düşüşünün elde edilebilmesidir. Sabit sıcaklıkta olan bir ısı kaynağı çubuk şeklindeki numunenin bir taraf ucuna uygulanır. Isı, eksen olarak daha düşük sıcaklıkta olan bir soğutucuya temas ettirilen diğer ucuna doğru akar. Numunenin radyal ısı alış verişisi hesaba katılmaz. Isıl iletkenliği hesaplamak için Denklem 1.29' dan çubuğun içinden ve dışından akan ısı akış hızının, numunenin kesit alanının, numune boyunca en az iki noktanın sıcaklıklarının ve sıcaklık ölçümünün yapıldığı noktalar arasındaki uzaklığın ölçülmesi gerekir.

Çok düşük sıcaklıklarda alınan ölçümlerin radyal ısı kaybı önemli bir sorun oluşturmaz. Bu sebeple ısı yalıtımına ve korumalı ısıtıcılara ihtiyaç yoktur. Ölçüm genellikle gaz iletimini ve konveksiyonu önlemek amacıyla yüksek vakum da yapılır. Ayrıca numune etrafını saran ışıma kalkanı, radyasyon kaybını minimuma getirmek için kullanılabilir. Numunenin bir ucuna verilen ısı, ince dirence sahip tel ısıtma bobini veya karbon rezistansı ile sağlanabilir.

Yüksek sıcaklıkta alınan ölçümlerdeki ısı kaybı çok önemli bir sorundur. Çünkü ışıma ısı transferi artan sıcaklıkla birlikte hızla artış gösterir. Meydana gelen bu radyal ısı kaybını önlemek amacıyla kontrollü bir koruma ısıtıcısıyla beraber numune çevresinde koruma tüpü kullanılabilir. Koruma tüpüyle numune arasında oluşan boşlukları doldurmak için genelde yalıtım tozu kullanılır. Berget [33, 34] 1887 yılında numune etrafındaki ısı kaybını önlemek için korumalı halka kullanmıştır.

Sıcaklık ölçümleri genellikle termal çiftlerle yapılır. Sıcaklık ölçümlerinin doğru ölçülebilmesi için termal çiftlerin uçlarının ısı iletimini mümkün olduğunca en aza indirmek için tellerin düşük iletkenliğe sahip olan alaşımlardan yapılmış olması gerekir [30].

Laubitz [35] ve Flynn [36] bu metodun yüksek sıcaklıklardaki ölçümler için uygun olup olmadığını etraflıca tartışmış ve eleştirmişlerdir. Bauerle [37], ölçümlerdeki sistematik hataların, termal temas dirençleri, zayıf termal çift bağlantıları ve sıcaklık sürüklenmeleri gibi ısı kaybı etkilerinin sebep olduğunu analiz etmiştir.

Bu metodun farklı bir şekli ise çubuk numunenin merkezindeki boşluğa ısıtıcı yerleştirilerek kullanılmıştır [38-40]. Ayrıca çubuğun iki ucuna da soğutucu

yerleştirilmiştir. İki uca doğru oluşan ortalama sıcaklık gradyentiyle ısı iletkenlik hesaplamaları yapılmıştır [28, 30].

1.2.1.1.1.2. Levha (Disk) Metot

Bu metot yarıiletkenler gibi zayıf iletkenler ve sıkıştırılmış metalik tozlar ve yalıtkanlar gibi düşük iletkenliğe sahip malzemeler için uygundur. Numune uzunluk-genişlik oranının önemli ölçüde küçük bir parçaya indirgenmesi dışında çubuk yöntemine benzedir. Numune geometrisi zayıf iletkenlerin ölçümleri için oldukça elverişlidir. Çünkü uzunluk-genişlik oranı ne kadar küçükse, numunenin ısı akışı sırasında daha az ısı kaybına neden olur. Dolayısıyla numune denge durumuna kısa zamanda gelir. Farklı türdeki malzemeler için tasarlanmış olan cihazlarda kullanılan numunelerin ebatları çok çeşitlilik gösterir. Yarı iletkenlerin ölçümü için tasarlanmış alet için numune yaklaşık 1 cm genişlikte [41] olabilir. Yalıtkan veya refrakter malzemelerinin ölçümü için yapılmış alette kullanılan numune 30 cm olmalıdır [42].

Levha disk metodunda ısı iletkenlik Denklem 1.29 ile elde edilir. Isı akış hızını tayin etmek için korumalı ısıtıcıya [42-44] elektriksel güç girdisi, korumalı su akış kalorimetresi [45], buhar kaybı kalorimetresi [46-49] ya da ısı akış tespit cihazıyla [50] yapılabilir. Sıcaklık ölçümleri numunenin içerisine yerleştirilmiş veya numune yüzeyine sıkı bir şekilde monte edilen termal çiftler yardımıyla ölçülür. Yanal kısımlarda oluşacak olan ısı kayıp korumalı ısıtıcılarla veya büyük ebatla bir numune üstündeki küçük bir merkezi alanda çalışılarak önlenebilir.

Levha metodunda, tek levha sistemi ve çift levha sistemi olmak üzere iki tür deneysel düzenek vardır. Tek levha sisteminde sıcak ve soğuk levhalar arasında numune varken, çift levha sisteminde dış tarafta iki soğuk levha ve ortasında sıcak levha arasında sandviç şeklinde benzer iki numune gerekir.

1.2.1.1.1.2. Karşılaştırmalı Metot

Bu metot ilk kez Franklin tarafından önerilmiştir. 1789 yılında ise Ingen-Hausz [51] geliştirmiştir. Karşılaştırmalı metotta çubuk şeklindeki farklı türdeki metaller balmumu ile kaplanmıştır. Metaller tek taraflı uçlarından sıcak suyun ya da yağın içine konularak ortak bir sıcaklığa getirilmiştir. Çubuk üzerindeki balmumu, iyi iletken olan malzemelerde, daha az iletken olan malzemelere göre çok daha fazla bir yere kadar

erimiştir. Geçmişte yapılmış olan bu deneyde kararlı hal durumundaki çubukların iletkenlik oranı bahsi geçen mesafenin karesiyle doğru yönde orantılı olduğu bildirilmiştir. Günümüzde, bölünmüş çubuk metodu ve karşılaştırmalı levha metodu olmak üzere iki şekilde incelenen modern karşılaştırmalı metotlar vardır [30].

1.2.1.1.2.1. Bölünmüş Çubuk Metot

Bölünmüş çubuk metodu ilk kez 1878 de Lodge tarafından uygulamaya konulmuştur [52]. Sisteme ısı iletkenliği bilinen bir veya birden fazla numune referans örnek olarak kullanılır. Isıl iletkenlik değeri bilinmeyen bir numunenin ölçümü bu şekilde yapılır. Referans numunesi ile ısı iletkenlik değeri bilinmeyen numunenin ısı akış hızı aynı kabul edilmiştir. Bu ideal koşullarda numunenin ısı iletkenliği (1.30) denklemi ile verilir.

$$K = k_r \frac{A_r (\Delta T / \Delta x)_r}{A (\Delta T / \Delta x)} \quad (1.30)$$

r indisi referans numuneyi ifade etmektedir. Metot iki grup da incelenbilir. Birincisi iyi iletkenlerin ısı iletkenliklerinin ölçümünde kullanılan uzun numune çubuk metodudur [53, 55, 56]. İkincisi ise zayıf iletken malzemelerin ısı iletkenliklerini tayin etmek için kullanılan kısa numune çubuk metodudur [52, 54, 57-60]. Karşılaştırmalı metotlar diğer metotlara kıyasla daha basit cihazlar ile işlem yapabilme ve numunenin kolay hazırlanması gibi oldukça avantajlı bir metottur. Dezavantajları ise termal çift aralıklarını belirlenmesinden meydana gelen ölçüm hataları, referans ile numune arasındaki iletkenlik uyumsuzluğu ve referans örneğinin iletkenliğindeki belirsizliktir. Flynn [36] bölünmüş çubuk metodunun tasarım olarak iyi olmadığını ve elde edilen verilerin ciddi hatalara sebep olabileceğini bildirmiştir.

1.2.1.1.2.2. Levha (Disk) Metot

Bu metot yalıtkan ve zayıf iletken malzemeler için uygun olan bir metottur. Genellikle bölünmüş çubuk metoduyla prensip olarak birbirlerine benzerler. Ama bu metot da referans ve ölçümü alınacak numune sıcak ve soğuk düz levhalar arasında yer almaktadır. Christiansen [61] bu metodu ilk defa 1881 yılında kullanmıştır. Böylece havanın ve sıvıların ısı iletkenlikleri karşılaştırılmıştır. Peirce ve Willson [62], camdan yapılmış plakaları referans malzeme olarak kullanarak, mermer levhaların ısı iletkenliklerini

ölçmüştür. Sieg [63], cihazın yanal kısmında oluşan ısı kaybını engellemek amacıyla koruma halkası kullanmıştır.

1.2.1.1.1.2.3. Bileşik Metot

Bu metotla mutlak ve karşılaştırmalı metotlar birbiriyle benzerlik gösterir. Bileşik metotta referans numuneyle ölçümü yapılacak olan numune seri konumda yerleştirilir. Isı akış hızı eş zamanlı olarak su akış kalorimetresi [64-66] veya ısıtıcının elektrik gücünün ölçülmesi ile tayin edilebilir.

1.3. Elektriksel Özellikler

Malzemelerin temel özelliklerinden bir diğeri ise, elektrik akımını iletme yeteneği veya yetenek eksikliğidir. Aslında, malzemeler iletkenler, yarı iletkenler ve iletken olmayanlar olmak üzere sınıflandırılır.

Metallerde ve alaşımlarda elektronlar (özellikle dış elektronların veya değerlik elektronlarının) elektrik iletiminde önemli bir rol oynamaktadır. Deneysel gözlemlerden çıkarılan yasalarla elektrik iletimini anlamak faydalı olacaktır [17].

1.3.1. Ohm Kanunu

Bir malzemenin elektrik akımını kolaylıkla iletmesi Ohm kanunu ile ifade edilebilir. Akım, uygulanan voltajla Denklem 1.31 de şu şekilde ilişkilidir;

$$V=IR \quad (1.31)$$

V (volt) potansiyel farkı, R (ohm) elektrik direnci ve I (amper) elektrik akımıdır. R , numunenin geometrisine bağlı olup birçok malzeme için de akımdan bağımsızdır. Elektriksel öz direnç R ile ilişkilidir ve Denklem 1.32 ile ifade edilirse;

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (1.32)$$

Burada l voltajın ölçümün alındığı iki nokta arasındaki mesafedir. A , akımın geçtiği yöne dik kesit alanıdır. ρ birimi (Ωm)'dir. Denklem 1.31 ve 1.32 kullanılarak Denklem 1.33 elde edilir [29].

$$\rho = \frac{VA}{Il} \quad (1.33)$$

1.3.2. Elektriksel İletkenlik

Bir malzemenin elektriksel direnci, o malzemenin elektrik akışına ne kadar direndiğini açıklar. Elektriksel iletkenlik ise σ ile temsil edilir ve öz direncin tersi olarak Denklem 1.34 de ki gibi tanımlanır [67].

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1.34)$$

Ohm kanunu bir diğer ifadeyle Denklem 1.35 ile yazılırsa;

$$J = \sigma \mathcal{E} \quad (1.35)$$

olur. Burada J akım yoğunluğudur ve malzemenin birim alanından geçen akım değeridir. $\mathcal{E}$ elektrik alan şiddeti olup, numunenin birbirinden belirli mesafede yer alan iki nokta arasındaki gerilim farkıdır [29]. Elektrik alan şiddeti Denklem 1.36 ile ifade edilir.

$$\mathcal{E} = \frac{V}{l} \quad (1.36)$$

Bir malzemenin elektrik direnci, numunenin belirli boyutundan veya şeklinden bağımsız, içsel bir fiziksel özelliktir. Bu, bilgisayardaki ince bir bakır telin, yine bakırdan yapılmış olan “Özgürlük Anıtı” ile aynı öz dirence sahip olduğu anlamına gelir [67].

Malzemeleri sınıflandırırken elektrik akımını iletme kabiliyetleri göz önüne alınır. Bu doğrultuda malzemeler: iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir. Metaller, $10^7 (\Omega.m)^{-1}$ mertebesinde elektrik iletkenliğine sahip olarak en iyi iletkendir. 10^{-6} ile $10^4 (\Omega.m)^{-1}$ arasında orta seviyede elektriksel iletkenliğe sahip malzemeler yarı iletkendirler. Diğer malzeme grupları ise 10^{-10} ile $10^{-20} (\Omega.m)^{-1}$ arasında değişkenlik gösteren çok düşük elektriksel iletkenliğe sahiptirler ve bu malzemeler yalıtkandır [29].

1.3.3. Termoelektrik Olaylar

Isıl ve elektriksel özellikler arasında uygulama yönünden bazı önemli olaylar vardır. Bunun en basit örneği direncin sıcaklıkla artış göstermesidir. Bu durumdan faydalanılarak sıcaklık ölçülür. Termoelektrik olaylar ilgi çekici üç durumda etkilerini gösterirler. Bunlar;

- Metal bir çubuğun farklı sıcaklıkta olan iki ucu arasında ısının yüksek sıcaklıktan düşüğe doğru akması sonucunda bir gerilim farkı doğar. Bu duruma *Seebeck olayı* denir.
- Metal bir çubuğun farklı sıcaklıkta olan iki ucu arasından akım geçirilirse ısı, akımın yönüne göre emilir veya yayılır. Bu olaya *Thompson etkisi* denir.
- İki farklı türdeki metal iletkenin ek yerinden akım geçirilirse ısı, akımın yönüne göre emilir veya yayılır. Bu olaya *Peltier etkisi* denir.

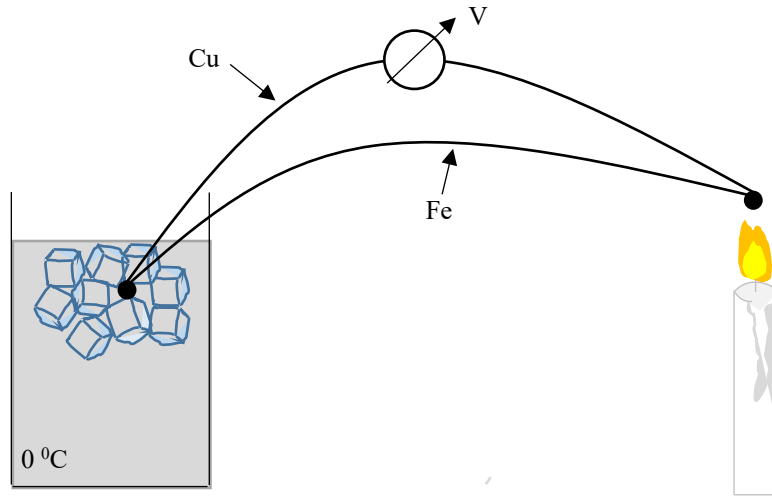
Uygulama bakımından büyük öneme sahip olan *Seebeck olayı* ve *Peltier etkisinden* aşağıda detaylı olarak bahsedilmiştir [68].

1.3.3.1. Seebeck Olayı

Şekil 1.1'de iki farklı tür malzemenin, örneğin; bakır ve demir telin uçlarında bir halka oluşturacak şekilde bağlandığını düşünelim. Bağlantı noktalarından biri diğerinden daha yüksek bir sıcaklığa getirilir. Daha sonra, bu iki termal çift arasında sıcaklık farkı (ΔT) ile orantılı olan bir potansiyel fark (ΔV) meydana gelir (Denklemler 1.37). Bu olay *Termoelektrik güç* ya da *Seebeck olayı* olarak adlandırılır [17].

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1.37)$$

Metal tellerden yapılmış termal çiftler, kolayca ulaşılamayan yerlerde bile sıcaklıkları ölçmek için sert, ucuz ve hızlı problemlerdir. Tablo 1.3 de bazı termal çiftlerin özellikleri yer almaktadır.



Şekil 1.1. Birbiriyle temas halinde olan Cu ve Fe metallerinden yapılmış termal çiftin şematik gösterimi.

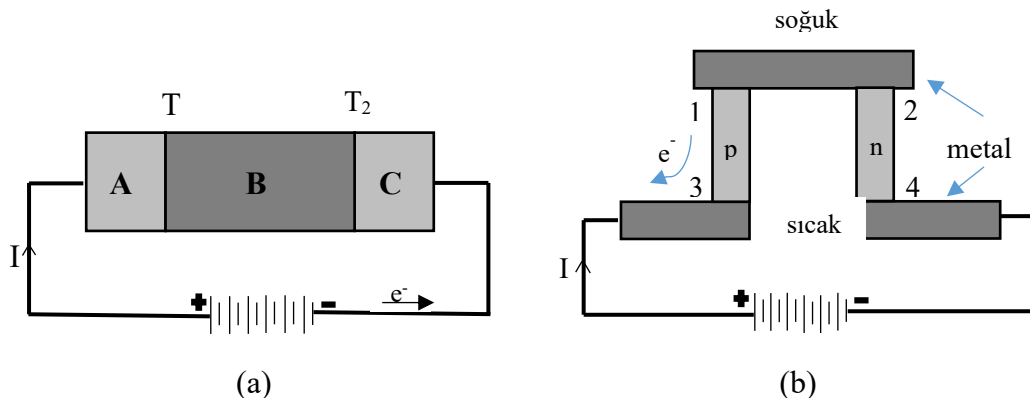
Tablo 1.3. Bazı termal çiftlerin özellikleri [68].

Termal Çift	Maksimum Sıcaklık (°C)	Duyarlılık (mV/°C)	Kullanıldığı Sıcaklık Aralığı (°C)
Kromel (90Ni-10Cr)	1250	0.0400	0-1250
Fe-konstanton (55Cu-45Ni)	850	0.0570	0-850
(Pt-10Rh)-Pt	1500	0.0120	0-1500
(Ir-40Rh)-Ir	2000	0.0185	1400-2000
(W-3Re)-(W-25Re)	2500	0.0139	0-1500

1.3.3.2. Peltier Etkisi

Seebeck etkisinin tersine çevrilmesi *Peltier etkisidir*. Farklı malzemelerden yapılmış bağlantılardan akım yönüne bağlı olarak akan bir doğrudan elektrik akımı, bir bağlantının soğumasına ve diğerinin ısınmasına neden olur (Şekil 1.2(a)). Kurşun tellür veya bizmut tellür bileşimleri sıklıkla kullanılır. 70 °C'ye kadar sıcaklık farklarının elde edildiği bir cihaz Şekil 1.2(b) de gösterilmiştir. Metallerle birlikte n-tipi ve p-tipi yarı iletkenler kullanılır. Soğutma, 1 ve 2 üst metal plakaya bağlanan bağlantılarda meydana gelirken, 3 ve 4 alt bağlantıda ısı oluşur. Alt plakada oluşan ısı, su veya hava soğutması ile uzaklaştırılır. Sıcaklık düşüşü, birkaç cihazın basamaklandırılmasıyla, yani her bir

aşamanın bir sonraki için ısı emici görevi gördüğü birden fazla termoelektrik soğutucunun birleştirilmesiyle arttırılabilir.



Şekil 1.2. Termoelektrik soğutma cihazları a) ana düzenlemesi (b) p ve n tipi yarı iletkenleriyle metali kullanan verimli bir cihaz.

Termoelektrik etkiler, elementlerin elektron teorisinin uygulanmasıyla açıklanabilir. İki farklı türde iletkenliğe sahip malzeme temas ettirildiğinde, her iki Fermi enerjisi eşit olana kadar elektronlar daha yüksek Fermi enerjisinden (E_F) daha düşük E_F 'ye sahip malzemeye doğru aktarılır. Sonuç olarak, daha küçük E_F 'ye sahip olan malzeme diğerine göre negatif bir yük alır. Bu, malzemeler arasında yukarıda bahsedilen temas potansiyeli ile sonuçlanır. Temas potansiyeli sıcaklığa bağlıdır. Spesifik olarak, bir malzeme ısıtıldığında, Fermi enerjisi boyunca önemli sayıda elektron daha yüksek enerji seviyelerine uyarılır. Bu fazla elektronlar ısıyı, sıcak bağlantıya göre negatif yüklü soğuk bağlantıya doğru sürüklenir. Bu olay eşdeğeri *Peltier etkisi* için geçerlidir. Daha büyük enerjiye sahip elektronların (yani, daha yüksek bir E_F 'ye sahip olanların), fazladan enerjilerini, daha düşük bir E_F 'ye sahip malzemeye aktaran akım neden olur. Aynı zamanda, daha yüksek E_F 'ye sahip olan malzemenin enerji kaybetmesine ve dolayısıyla soğumasına neden olur [17].

Malzeme grupları içerisinde en düşük *Peltier* katsayıları genellikle metal çiftlerinde görülür. Yarıiletken malzemelerde Peliter katsayısı oldukça büyüktür. (p-n) yarıiletken çiftleri uygulama da seri olarak bağlanırsa soğutma sağlanabilir. Mesela; Bi₂Fe₃-PbTe

seri bağlandığında termoelektrik soğutma oluşur. Bu türdeki soğutucular basit, küçük, sessiz ve düşük verimlidir.

Yarıiletken çiftlerin eki ısıtıldığında elektrik enerjisi üretebilir. Sb_2Se_3 -GeTe çiftlerinden oluşan termoelektrik jeneratörün verimi yaklaşık %10 civarında düşük bir değerde olmasına rağmen, basit ve hafiftir [68].

1.3.4. Katılarda Elektron Enerji Bant Yapıları

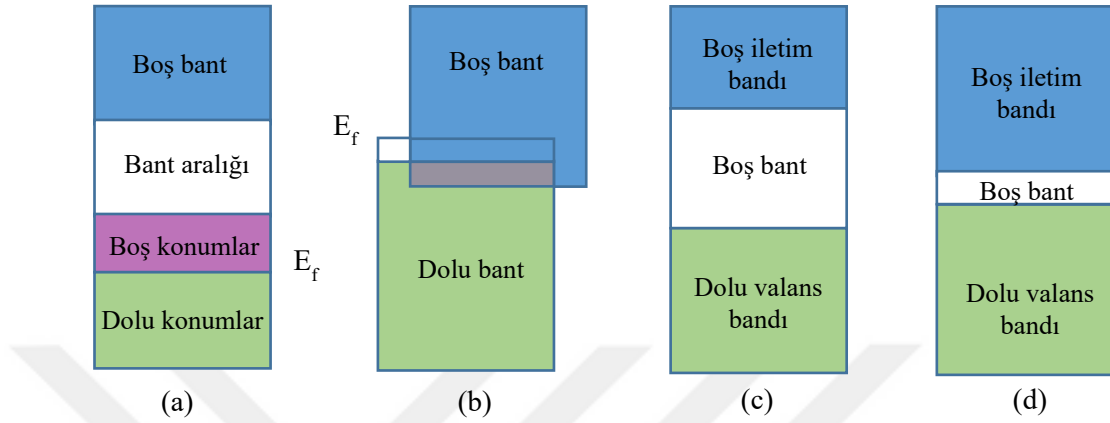
İletken, yarıiletken ve birçok yalıtkan malzemelerde elektriksel iletkenliğin büyüklüğü iletkenliğe katkısı olan elektronların sayısına bağlı olarak değişir. Elektrik iletkenliğini sağlayan elektronların sayısı, elektron dizilişi, enerji seviyeleri ve yerleşimleriyle doğrudan ilişkilidir [29].

Serbest elektron teorisi, değerlik elektronlarının hareket etmekte serbest olduğu ancak katı içinde sınırlı olduğu varsayımına dayanır. Bu model sadece metallere uygulanabilir ve serbest değerlik elektron teorisi [69] kuantum mekaniği açısından ele alındığında metallerdeki elektriksel ve ısı iletkenlik deneyleriyle nicel olarak uyum sağlar. Ancak yarı iletkenlerin ve yalıtkanların özelliklerini açıklamakta başarısız olmaktadır.

Enerji bant yapılarını anlamak için öncelikle elektronun yer aldığı enerji seviyeleri ve konumları incelenmelidir. Enerji seviyeleri tam sayılarla ifade edilen yörünge ve (s, p, d, ve f) harflerle gösterilen alt yörüngelerle ifade edilir. s, p, d, ve f alt yörüngeleri için 1, 3, 5 ve 7 enerji seviyeleri yer alır. Genellikle çoğu atom da, elektronlar en düşük enerji seviyesinde konumlanırlar. Pauli dışlama prensibinde, aynı enerji seviyesindeki iki elektron birbirine zıt yönde döner. İzole durumdaki bir atomun elektron düzeni, enerji seviyelerine göre elektronların dizilişini gösterir.

Atomlar arası mesafe nispeten büyükse, atomlar birbirinden bağımsızdır. İzole olmuş bir atomda, atomik enerji seviyesine ve dizilimine sahiptir. Fakat atomlar birbirine yaklaştığında, komşu olan atomun çekirdeği ve elektronları tarafından etkilenir. Bu etki ile katıda her bir atomun konumu, birbirlerine çok kısa mesafedeki bir seri elektron konumlarına ayrılır. Oluşan bu konumlara “*elektron enerji bandı*” denir. Atomlar bir araya geldiklerinde en dış elektron yörüngesinden ayrılma etkileşimi başlar. Her bir

bandın enerji konumları farklıdır. Fakat iki komşu konumun arasındaki fark bir hayli küçüktür [29].



Şekil 1.3. Katılarda 0 K'de (a) metallerde bant yapıları (b) metallerde, dolu valans bandı ile boş iletim bandının üst üste binmesi (c) yalıtkanların elektron bant yapı özelliği (d) yarı iletkenlerin elektron bant yapıları.

Bir katı malzemenin elektriksel özellikleri, en dışardaki bantta yer alan elektronların bulunma şekli ve elektron bant düzenine bağlıdır.

Sıcaklık 0 K olduğunda, dört farklı bant yapısının oluşması muhtemeldir. Şekil 1.3 de bazı malzemelerin elektron enerji bant yapıları verilmiştir. 0 K'da dolu olan en yüksek enerji seviyeleri Fermi enerjisi'dir ve E_F ile ifade edilir.

İlk olarak, Şekil 1.3 (a) da, elektronlar en dış da yer alan enerji bandında kısmen yer alır. Bu enerji bant yapısı, sadece s valans elektron bulunduran bazı metallerde nettir (mesela bakır). Bakır elementinin her atomu bir tane $4s$ elektronuna sahiptir. Fakat N atomu olan katı bir madde için bu $4s$ bandı $2N$ elektron bulundurabilir. Böylece $4s$ valans bandında mevcuttaki elektron konumlarının yalnızca yarısında elektron bulunur. Şekil 1.3 (b) de metallerdeki ikinci bant yapısı yer almaktadır. Burada dolu valans bandıyla boş iletim bandı üst üste çakışmıştır. Magnezyum metali bu bant yapısına uygundur. Şekil 1.3 (c) ve (d)'deki bant yapıları birbirine benzerdir. Elektronlarla dolu valans bandı ile boş iletim bandını bir enerji bant aralığı ayırır. Yüksek saflığa sahip malzemelerde bu bant aralığında elektron yoktur. Şekil 1.3 (c)'de yalıtkanların bant yapısında dolu valans bandı

boş iletim bandına kıyasla nispeten daha geniş bir enerji aralığına sahiptir. Şekil 1.3 (d)'de ise yarı iletkenlerde bulunan elektron enerji bant aralığı daha dardır.

1.3.5. Bant ve Atomik Bağ Modeline Göre İletkenlik

Elektronlar, Fermi enerji seviyesinden daha yüksek bir enerjiye sahipse elektrik alanından etkilenecek ivmelenirler. Bir atomun en dış elektronu olup iletkenliği sağlayan elektronlara “*serbest elektron*” denir. Yarı iletken ve yalıtkan malzemelerde boşlukta bir elektrik yüküne sahiptirler. Boşlukların enerjisi *Fermi enerjisi*'nden daha az olmasına rağmen iletme katkı sağlarlar. Serbest elektron ve boşuk sayısının farklı olması malzemeleri iletken ve iletken olmayan malzeme olarak ikiye ayırır [29].

1.3.5.1. Metaller

Bir elektronun serbest duruma geçmesi için, E_f üstünde yer alan boş bir enerji seviyesine uyarılması gerekir [29]. Şekil 1.3 (a) ve 1.3 (b) de yer alan bant yapısına sahip olan metallerde elektron tarafından dolu olan E_F seviyesine yakın konumda çok sayıda komşu olan boş enerji seviyeleri vardır. Düşük enerjiye sahip ve E_F seviyesine yakın olan elektronlar, boş olan enerji seviyelerine uyarılırken daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar. Bir elektronu iletken duruma uyarmak için bir elektrik alan tarafından sağlanan enerji yeterli olmaktadır.

Tüm valans elektronlar, serbest hareket kabiliyetine sahiptirler. Bu serbest elektronlar bir elektron bulutu oluşturduğunda, iyon çekirdeklerine sahip kafesin hepsinde birbirine benzer şekilde dağıldığı varsayılır. Bu elektronlar bir atoma bağlı değildir. Buna rağmen, elektronların elektriği iletebilmesi için uyarılmaları ve serbest hale geçmeleri gerekir. Sadece belirli oranda elektronun uyarılması bile, yüksek iletkenlik için yeterlidir.

1.3.5.2. Yalıtkanlar ve Yarı İletkenler

Yalıtkan ve yarı iletken malzemelerde, dolu valans bandının üstünde komşu durumunda boş enerji konumları yoktur. Bu sebeple, elektronların uyarılarak serbest duruma geçebilmesi için bant aralığını aşması ve boş iletim bandının en alt enerji seviyesine uyarılması gerekir. Bu bant aralığının aşılması ancak şu şekilde mümkündür: bir

elektrona, valans bandının üst enerji seviyesi ile iletim bandının alt enerji seviyesi arasındaki enerji farkı kadar bir E_g enerjisi verilmesi gerekir.

Yalıtkan ve yarı iletkenlerde bir sıcaklık artışı meydana gelirse, elektronların uyarılması için mevcutta var olan ısı enerjisi artar. Böylece, uyarılan elektron sayısı artarak iletim bandına geçer ve iletkenlik artar.

1.3.6. Metallerin Elektriksel Öz Direnci

Elektriksel öz direnç, elektriksel iletkenliğin tersidir. Çoğu metalin elektriksel iletkenliği oldukça iyidir. Metallerde çok sayıda serbest elektronun bulunması, bu elektronların E_F seviyesi üzerindeki boş enerji seviyelerine uyarılması durumunda, elektriksel iletkenliğini artırır.

Metallerdeki yapı kusurları, iletkenliği sağlayan elektronlar için saçılma merkezi gibi davranır. Kusur sayılarının artması, öz direnci artırır ya da tam tersi elektriksel iletkenliği azaltır. Bu kusurların derişmesi, sıcaklığa, bileşime ve numunenin soğuk şekillendirmesinin şiddetine göre değişir [30].

1.4. Mekanik Özellikler

Malzemelerin belirlenen bir yük altındaki davranışları *malzemelerin mekanik özellikleri* olarak ifade edilir [70]. Malzemelerin mekanik özellikleri farklı deneysel yöntemlerle belirlenir. Çekme, basma, eğme, burulma, sertlik ve sürünme deneyleri malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan en yaygın deneysel metotlardır.

Bu tez çalışmasında, lehim alaşımlarının çekme ve sertlik deneyleri yapılmıştır.

1.4.1. Sertlik Ölçme Deneyi

Sertlik; sürtünme, kesme, çizme ve plastik deformasyona karşı malzemelerin göstermiş oldukları dirençtir. Sertlik ölçme deneyi genellikle çok sert konik veya küresel standart bir ucun numuneye batırılmasıyla gerçekleştirilir. Oluşan plastik deformasyona karşılık numunenin göstermiş olduğu direnç ölçülür ve sonucunda sayısal bir değer elde edilir. Aşağıda sıklıkla kullanılan sertlik ölçme yöntemleri yer almaktadır.

- a. Brinell sertlik ölçme deneyi
- b. Rockwell sertlik ölçme deneyi
- c. Knoop sertlik ölçme deneyi
- d. Vickers sertlik ölçme deneyi.

1.4.1.1. Brinell Sertlik Ölçme Deneyi

Sert bir bilyenin malzeme yüzeyine batırılarak, yüzeyde kalıcı bir iz oluşturmaları ve bu izin ölçülmesi deneyidir. Brinell sertlik ölçme deneyinde (BSD) kullanılan bilyeler, çelikten veya sert karbürlerden yapılır. Standart yük ağırlığı 500-3000 kg arasında değişir [29]. Bilye numune üzerinde 10-30 sn aralığında bekletilir ve yüzeyde oluşan izin ebatları ölçülerek malzemenin sertliği belirlenir. Hesaplama işleminde Denklem 1.38 kullanılarak Brinell sertlik değeri;

$$BSD = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (1.38)$$

bağıntısı ile bulunur. Burada, F ; deney yükü (kgf), A ; izin küresel yüzey alanı (mm^2), D ; bilye çapı (mm), d ; bilyenin yüzeyde yaptığı izin çapı (mm).

Brinell sertlik ölçümü yapılacak olan numunenin yüzeyi düz ve parlak olmalıdır. Malzemenin sertliği hakkında sağlıklı bir veri elde edilmesi için en az üç farklı noktadan sertlik alınarak ortalama belirlenmelidir. Ölçümü yapılacak olan numunenin kalınlığı, bilyenin batma derinliğine göre tayin edilir. Yani malzeme kalınlığı bilyenin oluşturacağı iz derinliğinin 8 katından az olmamalıdır [70].

1.4.1.2. Rockwell Sertlik Ölçme Deneyi

Rockwell sertlik ölçme deneyi (RSD), yumuşak malzemeden sert malzemelere kadar pek çok metalin sertlik ölçümüne yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Malzeme yüzeyine sert bir ucun (elmas konik uç ya da sertleştirilmiş çelik bilye) batırılması prensibine dayanır. Batıcı uçun tepe açısı 120° , uç kısmı ise 0.2 mm yarıçapındadır. Rockwell sertlik ölçme deneyinde 60, 100, 150 kgf'lik yükler kullanılır.

Rockwell sertlik ölçme deneyinde batıcı uç malzemeye her 0.002 mm'lik batışında sertlik değeri 1 sayı düşer. Rockwell ölçeği, malzeme cinsine, sertliğine ve içyapısına göre değişkenlik gösterir. Bazı durumlarda malzemelerin sertliğinin ölçümünde birden fazla ölçek kullanılabilir. Öncelikle en küçük bilye ile ölçüm yapılır. Bilye çapı büyüdükçe ölçüm hassasiyeti azalır. Fakat homojen yapıda olmayan yumuşak malzemelerde büyük bilye kullanılması daha gerçekçi sonuçlar verir. Batıcı ucun, malzemeye derin batması bu numunenin o kadar yumuşak olduğunu gösterir [71-73].

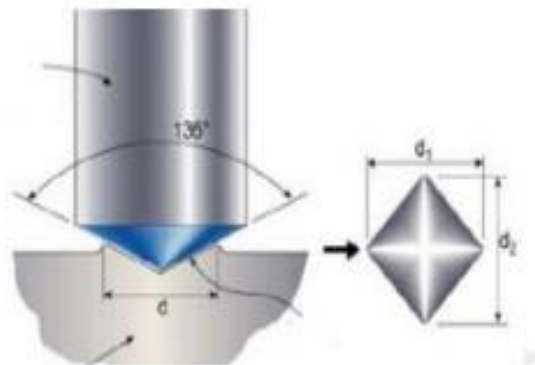
1.4.1.3. Knoop Sertlik Ölçme Deneyi

Knoop sertlik testinin elmas gibi sert ve kırılgan tek kristaller için uygun olduğuna inanılmaktadır [74, 75]. Deney, 10-1000 g arasında yük uygulanarak belirli bir süre kadar uygulanır. 172° tepe açısına sahip olan elmas piramit uç kullanılır. Knoop sertlik deneyinde elde edilen izin köşegen uzunluğu ölçülür ve uygulanan yük iz alanına bölünerek Denklem 1.39'dan Knoop sertlik değeri (KSD) bulunur.

$$KSD = \frac{\text{Uygulanan Yük}}{\text{İz Alanı}} \quad (1.39)$$

1.4.1.4. Vickers Sertlik Ölçme Deneyi

Malzemenin yüzeyine batırılarak yapılan sertlik ölçme yöntemlerinden birisidir. Sertlik ölçme deneyinde numune yüzeyine taban kısmı kare şeklinde olan piramit elmas uç uygulanır. Vickers sertlik ölçümünde kullanılan ucun yüzeyleri arasındaki açı 136°'dir.



Şekil 1.4. Vickers sertlik ölçümünün şematik olarak gösterilmesi [76].

Vickers sertliği, deney yükünün iz alanına bölünmesiyle bulunur. Numune yüzeyinde oluşan izin d_1 ve d_2 olarak isimlendirilen köşegenler ölçülür ve ortalaması not edilir. Böylece taban köşegen değeri (d) belirlenir. Vickers sertliği Denklem 1.40 ile hesaplanır.

$$VSD = \frac{F}{A} = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (1.40)$$

VSD; Vickers sertlik değeri (kgf/mm²), F ; uygulanan yük (kgf), A ; iz alanı (mm²). Vickers sertlik ölçme deneyinde genellikle 1 kgf-120 kgf arasında yük uygulanır [70]. Deney sırasında uç, numune yüzeyine belirlenen bir kuvveti 5-30 saniye arasında uygular ve numune yüzeyinde bir iz oluşturur. Vickers sertlik ölçme deneyi ile çok ince bölgelerin sertliği bile kolaylıkla ölçülebilir. Bu yöntem aynı zamanda mikrosertlik testi olarak da bilinir [72, 73, 77]. Mikro Vickers sertlik ölçme deneyinde ise 1grf- 1kgf arasında yük kullanılır. Uygulama süresi ise 10-15 saniyedir [70].

1.4.2. Çekme Deneyi

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek ve mekanik davranışlarına göre sınıflandırmak amacıyla kullanılan yaygın metotlardan birisi de çekme deneyidir. Çekme deneyi, basit bir ifadeyle tarif edilecek olursa; belirli standartlara göre hazırlanan numunelerin tek ekseninde sabit bir hızla kopana kadar çekilmesidir [71]. Numunelere uygulanan yük, numunenin boyunu uzatacak biçimde eksen doğrultusunda olmalıdır. Çekme deneyinde göz önüne alınması gereken kıstaslar vardır. Bu kıstaslar şunlardır;

- a) Numune standartlara uygun olarak hazırlanmalıdır.
- b) Numuneye tek bir ekseninde statik bir yük uygulanmalıdır.
- c) Numune bilinen bir hızda çekilmelidir.
- d) Numunenin çekildiği sıcaklık bilinmelidir.

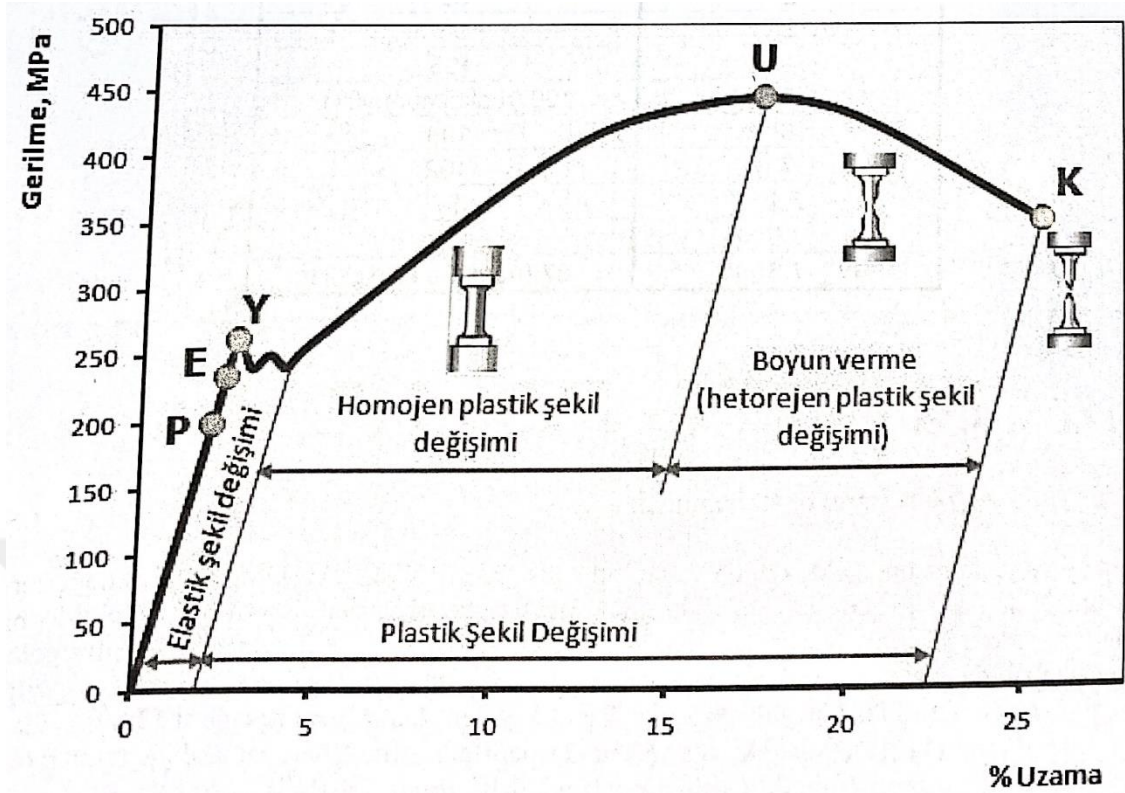
Bu maddeler değiştiğinde, çekme deney sonuçları da değişir [70].

Şekil 1.5 de gerilme-% uzama diyagramı verilmiştir. Diyagram üzerine işaretlenen noktalar üzerinden çekme deneyi daha net anlaşılacaktır. Eğrinin başlangıcından P noktasına kadar, doğrusal bir eğri vardır. Numuneye uygulanan düşük şiddetteki kuvvet seviyelerinde, numunenin uzama miktarı, kuvvet ile doğru orantılıdır. Bu nedenle belirli bir eğimde doğrusal bir eğri meydana gelir. Bu eğimin sonlandığı P noktasına kadar, numune elastik davranış sergiler. Yani malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığında,

uzama miktarı sıfırlanır. Böylece malzemenin boyu tekrar eski haline döner. Dolayısıyla malzemede kalıcı şekil değişimi oluşmaz. Eğrinin başlama noktasından P noktasına kadar ki doğrusal bölgeye, “*orantı sınırı*” denir. Numuneye uygulanan kuvvet, orantı sınırını geçtiğinde, eğrinin lineerliği belirli bir eğimle azalmaya başlar. Bu kaybolma, E noktasına yani elastik sınır olarak isimlendirilen noktaya kadar devam eder. Uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman, numune tekrar eski haline döner. Eğer numuneye uygulanan kuvvet devam ederse, E noktasından sonra plastik deformasyon yani malzemede kalıcılık başlar. Kuvvet sıfır olduğunda ise deformasyon artık sıfır olmaz, ama belirli bir plastik deformasyon oluşur. Bu sebeple E elastik sınırının üstündeki kuvvet uygulamalarında kalıcı plastik şekil değişimi, sınırının altındaki kuvvet uygulamalarında ise elastik davranış meydana gelir. Bazı malzemelerde elastik sınır, orantı sınır değeriyle aynı alınabilir. Elastik sınırının ölçümünün kolay olmadığı durumlarda, %0.01 veya %0.005 plastik uzamaya karşılık gelen kuvvet değerleri alınarak, elastik sınır değeri tespit edilir.

Numuneye uygulanan kuvvet E noktasını geçerse, kuvvetin neredeyse sabit kalmasına karşın, malzemedeki plastik şekil değişimi önemli derecede artar. Bu durum eğri de gösterilen Y noktasına kadar devam eder. Eğri üzerinde yer alan bu nokta numunenin akma sınırındır. Akmanın başladığı kuvvet üst akma, akmanın devam ettiği ortalama kuvvetse alt akma sınırındır. Akma değeri, bazı malzemelerin çekme eğrilerinde tam olarak belirgin değildir. Eğer akma değeri, net değilse $\epsilon_{plastik} = 0.2\%$ karşılık gelen kuvvet sınırı, akma sınırı kabul edilir. Buna “*0.2 teknik akma sınırı*” denir.

Numuneye uygulanan kuvvet artarak akma bölgesini geçtiğinde, eğride yer alan U noktası maksimum kuvvet noktasına ulaşılır. U noktasında, malzemede kısmi kesit daralmaları başlar ve bu duruma malzemenin boyun vermesi denir. Yani uygulanan kuvvet U noktasını geçer geçmez, numunede boyun verme başlar. Malzeme kesit alanı daraldıkça taşıdığı kuvvet azalır. Böylelikle malzemenin kesiti daralarak azalır ve eğrinin K noktasında kopar. Numunenin koptuğu bu nokta kopma noktası olarak isimlendirilir [70].



Şekil 1.5. Gerilme-% uzama diyagramı.

Gerilme, Denklem 1.41 ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1.41)$$

Burada, P çekme kuvveti, A_0 ise malzemenin ilk kesit alanıdır. Gerilme birimi N/mm^2 veya MPa 'dır. Birim uzama miktarı, Denklem 1.42 eşitliği ile belirlenir.

$$\text{Birim uzama} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.42)$$

Burada, Δl anlık alınan deformasyon miktarı, l_1 numunenin uzayan boy miktarı, l_0 numunenin başlangıç uzunluğudur. Bir malzemenin çekme-dayanımı yüksekse o malzeme düşük sünekliğe sahiptir.

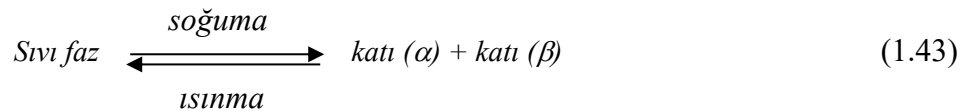
Mekanik özelliklerden bir diğeri de sünekliktir. Süneklik, kırılmaya kadar numunede oluşabilecek plastik deformasyonun miktarının ölçüsüdür. Kırılma anına kadar malzeme çok az veya hiç plastik deformasyon göstermezse gevreklerdir. Metallerin çoğu oda sıcaklığında orta seviyede sünekliğe sahiptir. Bazıları ise sıcaklık azaldıkça gevrek özellik gösterir.

1.5. Faz Diyagramları

Faz diyagramları, denge koşulları altında sistem içinde ortaya çıkan çeşitli fazlar arasındaki ilişkileri göstermek için tasarlanmış grafiksel çizimlerdir. Faz diyagramı, denge diyagramı ve yapısal diyagram gibi çeşitli şekillerde diyagramlar mevcuttur. Tek bileşenli bir faz diyagramı, sıcaklık veya basınç değişiklikleri olarak verilen bileşendeki (örneğin demirdeki) faz değişikliklerini gösteren basit bir şekilde bir boyutlu ya da iki boyutlu bir çizim olabilir. Bununla birlikte pek çok diyagram, iki veya daha fazla bileşenden oluşan sistemlerdeki faz ilişkilerini tanımlayan iki boyutlu grafiklerdir. Bunlar genellikle tek fazlı alanların yanı sıra çoklu faz alanlarından oluşan alanlar içerir [78].

1.5.1. İkili Faz Diyagramı

Katı çözünürlük, birçok metalik ve seramik sistemin bir özelliğidir ve bileşenler kristal yapı ve atomik (iyonik) çapta benzerliklere sahip olduğunda tercih edilir. Bu çözünürlük, uzatılmış (sürekli) veya sınırlı olabilir. İlk durum, katı çözeltinin (α) bileşenden bileşene uzandığı nikel-bakır sistemi için ikili faz diyagramı ile gösterilmektedir. Saf metallerin ani (uyumlu) erime noktalarının aksine, araya giren alaşımlar, tek değişkenli iki fazlı (α + sıvı) alanla ilişkili bir sıcaklık aralığında donar veya erir. Bu “*macunsu bölge*”, sıvı ve katı olarak bilinen iki çizgi arasında yer alır [79]. Ötektik nokta; faz diyagramında V şeklinde olan B noktası ile ifade edilen sıvılık (liquidus) eğrilerinin tabanındaki noktadır. Ötektik noktadaki bileşim “*ötektik bileşim*”dir. Ötektik bileşim olarak adlandırılan bir alaşım, ötektik sıcaklıkta erir [68]. İki bileşimli alaşımlarda ötektik bileşimde olan sıvı faz soğutulduğunda farklı katı iki faz oluşur. Ya da tam tersi; sıvı alaşımın katılaştırılmasıyla α ve β katı fazlarının karışımı elde edilir. Bu durumda ötektik reaksiyon, Denklem 1.43 ile

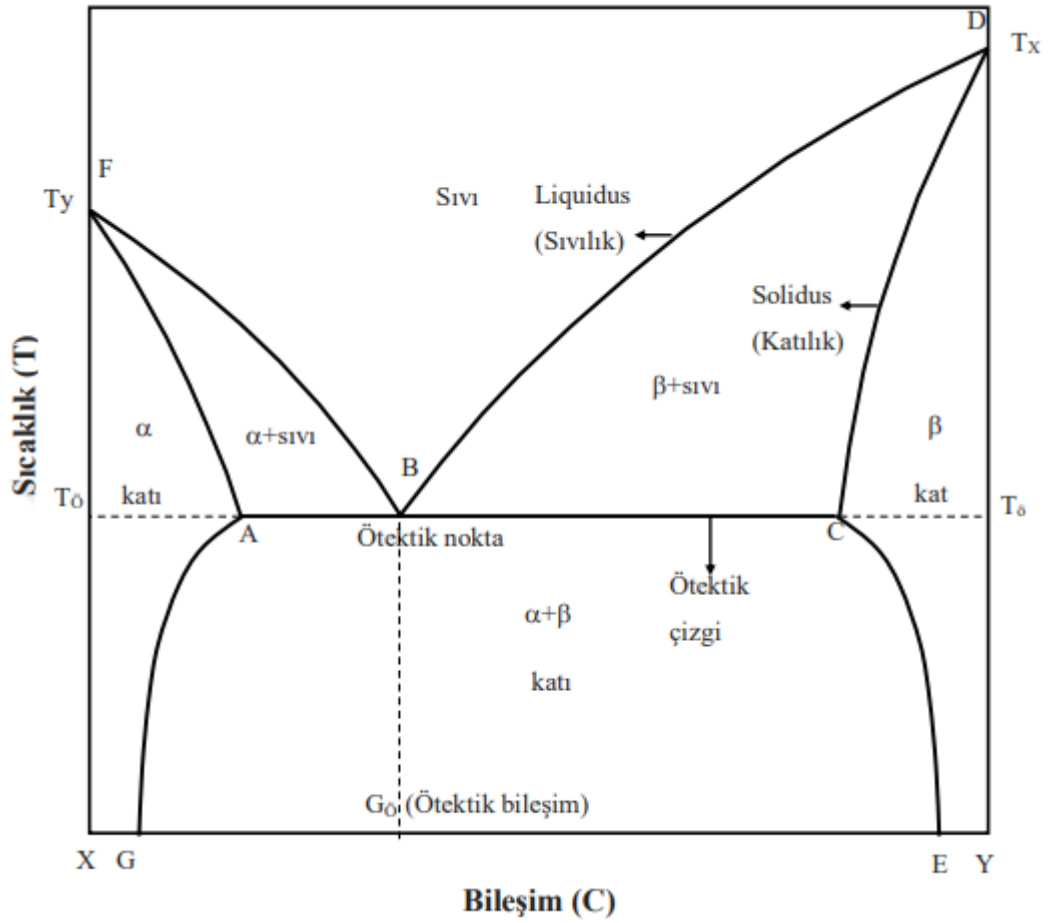


olarak tanımlanır [26]. İkili faz diyagramlarında X eksenini bileşim, Y eksenini sıcaklığı gösterir. Yatay eksenin başlangıcı %100 oranında X maddesi içerirken eksenin sonunda ise %100 oranında Y maddesi içerir. Bileşim miktarı ağırlıkça veya atomik orana göre belirlenir.

Şekil 1.6’da basit bir ikili ötektik faz diyagramı yer almaktadır. Diyagram da α ve β katı fazları ve sıvı faz olmak üzere üç adet tek fazlı bölge yer alır. ABC çizgisinin altındaki

herhangi bir sıcaklıkta Y maddesinin sınırlı bir miktarı X maddesi içinde (α fazı) ve X 'in sınırlı bir miktarı da Y içinde (β fazı) çözünabilmektedir. α fazı'nın çözünabilirlik sınırı A noktasına kadar artarken F noktasına doğru da azalarak sıfıra iner. AG çizgisi α ve $\alpha+\beta$ fazlarını ayıran çözünabilirlik sınırıdır ve *solvüs* olarak adlandırılır. AF çizgisi α ve $sıvı+\alpha$ fazlarını ayıran çözünabilirlik çizgisine de *solüdüs* adı verilir. β fazının çözünabilirlik sınırı ise ECD çizgisi ile gösterilmiştir. CE çizgisi *solvüs*, CD çizgisi ise *solüdüs*'tür. Şekil 1.6 da yer alan ikili faz diyagramında $\alpha + sıvı$, $\beta + sıvı$ ve $\alpha + \beta$ olmak üzere üç farklı ikili faz mevcuttur. FB çizgisi, Y içerisinde X ilavesiyle alaşımın tamamıyla sıvı faz olduğu sıcaklık, likidüs çizgisi boyunca azalır. Yani X 'in erime sıcaklığı Y ilavesiyle düşmektedir. Aynı durum X içerisine Y ilavesiyle de oluşur. Y maddesinin ergime sıcaklığı X maddesinin ilavesiyle azalmaktadır (DB çizgisi).

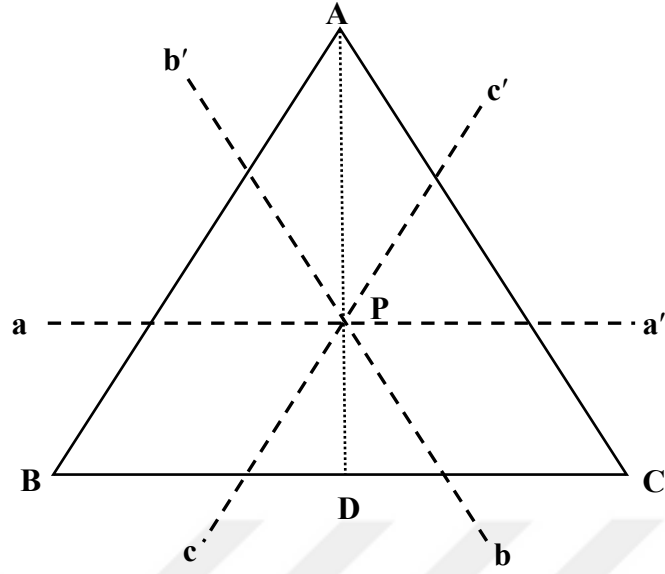
B noktası ötektik noktadır. Sıvı fazdan $\alpha + \beta$ ikili katı fazına dönüşen alaşıma ötektik alaşım denir. ABC yatay çizgisi ise ötektik çizgidir [29, 70].



Şekil 1.6. İkili ötektik faz diyagramı [80].

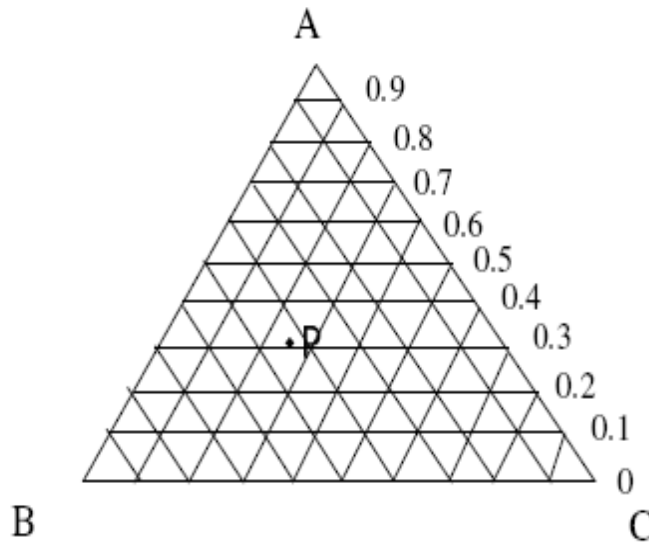
1.5.2. Üçlü Faz Diyagramı

Üçlü faz diyagramı, sabit sıcaklık ve basınçta üç bileşenden oluşan bir karışımın bileşimine göre olası fazları ve bunların dengelerini gösterir. Üçlü faz diyagramında, sıcaklıkla değişen yapısal değişimleri tanımlayabilmek için üç eksen yer alır. A, B ve C elementlerinden oluşan üçlü faz diyagramı Şekil 1.7'de gösterilmektedir. Üçlü faz diyagramlarının kullanımı zordur. Bu sebeple iki eksenden oluşan üçlü faz diyagramı çizilerek, faz diyagramlarının okunması daha kolay olmaktadır [70]. Şekil 1.7'de yer alan üçlü faz diyagramına P noktasından geçen ve üçgenin kenarlarına paralel olacak şekilde doğrular çizilmiştir. Bu çizgiler, bileşim oranının ifade edildiği P noktasının bulunabilmesinde yardımcıdır.



Şekil 1.7. Üçlü faz diyagramı.

İki eksen içeren üçlü faz diyagramları, üçgen şeklinde gösterilir. Üçgen köşegenleri %100 saf elementi gösterir. Şekil 1.8 de üçlü ABC alaşımında, üçgenin A köşesinde %100 A maddesi, B köşesinde %100 B maddesi, C köşesinde ise %100 C maddesi bulunur [70].

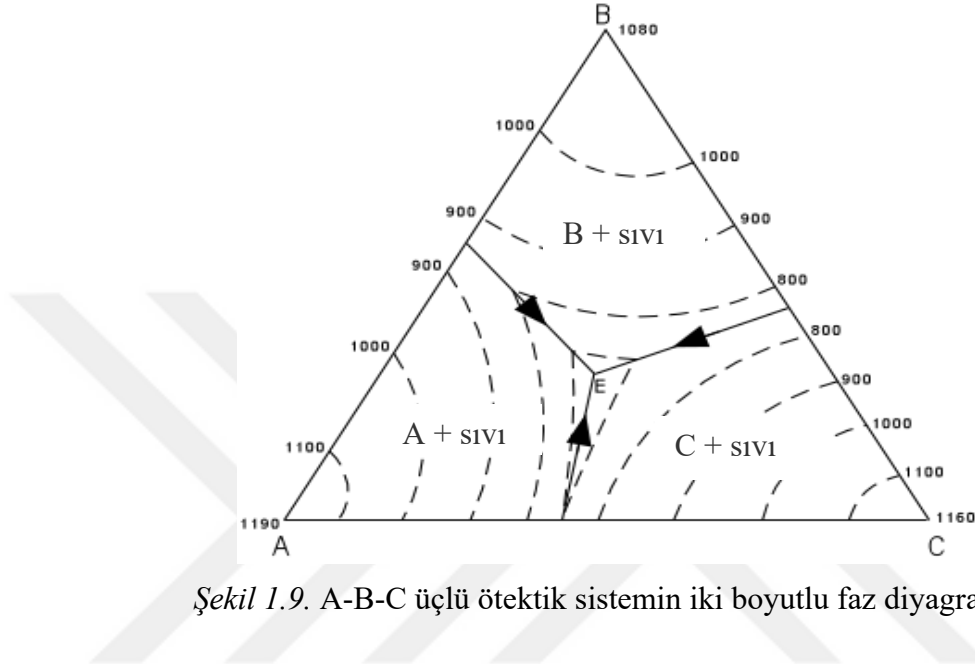


Şekil 1.8. Ölçekli üçlü faz diyagramı.

Gibbs diyagramları gibi ölçekli diyagramlar kullanılarak da faz diyagramındaki herhangi bir noktanın bileşimi hesaplanabilir. Şekil 1.8'de atomik kesirlere göre hazırlanmış

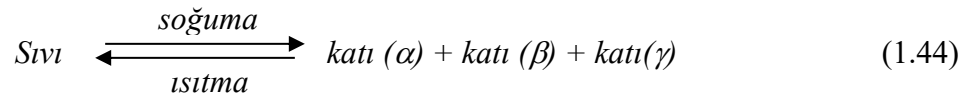
ölçekli bir faz diyagramı verilmiştir. Alaşımdaki maddelerin mol kesirleri toplamı 1 olmalıdır.

İki boyutlu üçlü faz diyagramı Şekil 1.9'da yer almaktadır.



Şekil 1.9. A-B-C üçlü ötektik sistemin iki boyutlu faz diyagramı.

Üç boyutlu faz diyagramı iki boyuta indirgendiğinde üç boyutlu faz diyagramında yer alan izoterm çizgileri ve sınır eğrilerine dikkat edilmelidir. Üçlü ötektik nokta E harfi ile gösterilmiştir. Ötektik noktadaki sıvı faz soğutulduğunda üç farklı faz oluşur. Sıvı alaşımın katılaştırılması sonucunda ise katı α , β ve γ fazlarının karışımı elde edilir. Bu durumda üçlü ötektik reaksiyon Denklem 1.44 ile aşağıdaki gibi verilir [30].

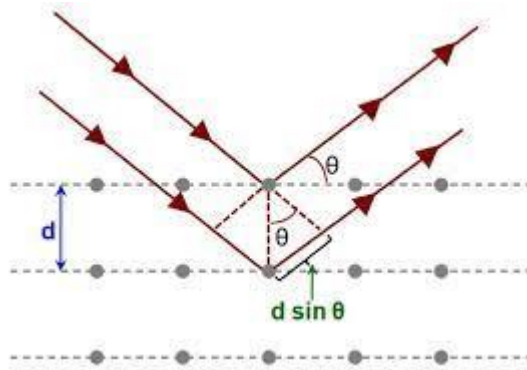


1.6. X-ışını Toz Kırınımı

Kristallerin iç yapısını detaylı bir şekilde araştırmak X-ışınlarının kırınımıyla gerçekleşir. Kırınım, gönderilen dalga boyuna ve kristalin yapısına bağlı olarak değişir. Kristal yapıda olan katılarda X-ışını kırınımı, atomik yerleşimleri X-ışınlarının dalga boyu olan 10^{-10} m mertebesinde olduğu için gerçekleşir. Işının 0.1-10 Å mertebesinde dalga boyuna sahip olmalıdır. Kristalin atomik yapısıyla ilgili doğru bilgiyi verebilecek

olan ışının çözünürlüğü hemen hemen ışının dalga boyuyla eşittir. Katılarda birbirine komşu olan atomların arasındaki mesafe ortalama 10^{-10} m (1 Å) civarındadır.

Bir kristalde kırınımın gerçekleşmesi ilk kez Bragg tarafından kanıtlanmıştır [27]. Şekil 1.10 da iki boyutlu bir kristal kafes ve bir dizi hayali düzlem temsil edilmektedir.



Şekil 1.10. Bragg yasası [83].

Ardışık saçılma merkezleri X-ışınlarını yansıtır ya da paralel düzlem takımlarıyla kırar. Kübik sistemlerde, Denklem 1.45'deki gibi düzlemler arası mesafe d (hkl), örgü sabiti (a) ile doğru orantılıdır [27].

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (1.45)$$

Bir θ açısında kristal üzerine gelen X-ışınları, kat edilen mesafe ($2d \sin\theta$) arasındaki fark dalga boyunun ($n\lambda$) bir tam sayısına eşit olduğunda tutarlı kırınım (fazda) üretir [83]. Bragg yasası, Denklem 1.46 ile ifade edilir.

$$\lambda = 2d_{(hkl)} \sin \theta \quad (1.46)$$

X-ışınları ile oluşturulan kırınım basittir. Kübik, tetragonal, ortorombik gibi basit örgü tiplerine kolaylıkla uygulanabilir [27].

1.7. Lehimler

Elektronik devrelerde sistemin oluşturulması için gerekli olan elemanları ve telleri birbirine tutturmak amacıyla kullanılan ve erime noktası 425°C 'nin altında eriyebilen tellere lehim denir [85, 86]. Muazzam elektronik malzeme dünyasında lehim, elemanların montajında ve birbirine bağlanmasında çok önemli bir rol oynar. Bir birleştirme malzemesi olarak lehim, elektronik tertibatlar da elektriksel, termal ve mekanik süreklilik sağlar. Lehimin performansı ve kalitesi, bir lehim bağlantısının bütünlüğü için çok önemlidir ve bu da montajın genel işleyişi için hayati önem taşır [2]. Bu sebeple tercih edilecek olan lehimin uygulanacak olan bölgeye uyum sağlaması gerekir. Eklem yerini oluşturacak olan lehimin devre bağlantısını en az kusurla tamamlayabilmesi için elektriksel iletkenlik, ısı iletkenlik, erime davranışları ve mekanik özellikler bakımından iyi olması gerekir.

Lehimler kullanım alanlarına göre yumuşak ve sert lehimleme olarak sınıflandırılır. Yumuşak lehimleme, erime sıcaklığı 500°C 'den düşük olan lehimlerin kullanıldığı lehimlemedir. Bu lehimleme türü genellikle elektrik ve elektronik alanlarda kullanım alanı bulur. Sert lehimleme, erime sıcaklığı 500°C 'den yüksek olan lehimlerin kullanıldığı lehimlemedir. Mekanik özellikleri çok iyi olduğu için çoğu yerlerde kullanılır.

Elektronik uygulamalarda kullanılan lehim, öncelikle ötektik bir bileşim olan 63Sn-37Pb veya ötektik bir bileşim olan 60Sn-40Pb'dir. 183°C 'lik bir erime ötektik sıcaklığı ile Sn-Pb ikili sistemi, çoğu alt katman malzemesi ve cihazı ile uyumlu lehimleme koşullarına sahiptir [87]. Sn-Pb lehim malzemesinin avantajları beraberinde pek çok dezavantaj da getirmektedir. Özellikle kurşun metalinin zararları ciddi boyuttadır. Yüksek atom ağırlığına sahip metalik bir elementlerden biri olan kurşun düşük oranlarda canlılara zarar verebilir ve besin zincirinde birikebilir [88]. Çevrede kalıcı olmakla beraber, bitki ve hayvan dokularında birikebilir. Madencilik, endüstriyel atıklar ve kanalizasyon çamuru ağır metal kirliliği kaynaklarından birisidir [89]. Elektronik endüstrisinde Pb kullanımına ilişkin endişe, mesleki eksiklikten, üretim sürecinden kaynaklanan Pb atığından ve elektronik düzeneklerin atılmasından kaynaklanmaktadır. Elektronik endüstrisi tarafından Pb tüketimi asgari düzeyde görünse de [90], kurşuna maruz kalma potansiyeli göz ardı edilemez. Elektronikte potansiyel bir mesleki maruziyet kaynağı, lehimleme işlemi, özellikle de dalga lehimleme işlemidir. Çalışmalar da, normal lehimleme

sıcaklıklarında Pb nispeten uçucu olmadığı için elle lehimleme ve kalaylama işlemlerinde Pb'ye maruz kalma tehlikesinin çok az olduğu gösterilmiştir [25]. Ancak dalga lehimleme işlemi sırasında cüruf tarafından üretilen Pb buharlarının veya Pb içeren tozların solunması işçiler için olası bir tehlikedir. Dalga lehimleme, erimiş lehimin yüzeyindeki yüzey oksidasyonu nedeniyle cüruf oluşturur. Dalga lehimleme esnasında meydana gelen cürufun yaklaşık %90'ı yeniden kullanım için saf metale dönüştürülebilir, ancak geri kalan bir atık üründür [90].

Alternatif lehimleme malzemeleri ve işleme yaklaşımları için baskı yapan yasal, çevresel ve teknolojik faktörler vardır. Bu faktörler şunları içerir:

- Çevresel ve toksikolojik kaygılar nedeniyle Pb kullanımını vergilendiren, kısıtlayan veya ortadan kaldıran mevzuat.
- Farklı erime sıcaklıklarına sahip farklı tipte lehimler gerektiren karmaşık montajların kademeli lehimlenmesi ihtiyacı.
- Sn-Pb lehimin sağlam ve güvenilir lehim bağlantıları sağlamak için fiziksel kapasitesini genişleten, yüzeye montaj teknolojisinde paketlenme ve ara bağlantı minyatürleştirmeye yönelik devam eden eğilim.

Elektronik endüstrisinde özel uygulamalar için kullanılan Sn-Ag, Sn-In, Sn-Bi, Sn-Au gibi birkaç Pb içermeyen lehim vardır. Günümüze kadar pek çok araştırmacı ötektik Sn-Pb'nin yerine gelebilecek yeni alaşımlar geliştirmeyi hedeflemiştir. Bu yeni alaşımların çoğu ikili değil üçlü, dörtlü ve beşlidir [87]. Tablo 1.4 de lehim alaşımlarının termal, elektriksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.

1.8. Sn-Zn Alaşımları

Ren ve Collins [83], Sn-8Zn-3Bi alaşımlarının mikroyapı, ısı ve mekanik özellikler üzerindeki Sb etkisini incelemişlerdir. Sn-8Zn-3Bi alaşımı ile ağırlıkça %0.5 ile 1.5 Sb ilavesiyle oluşturulan alaşımların erime sıcaklığı karşılaştırıldığında hafifçe artarken, geçiş aralığının değişmediği bildirilmiştir. Ağırlıkça %1.5 Sb ilavesi ile çekme dayanımı ve Young modülü Sn-8Zn-3Bi lehim alaşımına kıyasla iyileştirildiği bulunmuştur. Uzamanın, daha yumuşak bir mekanizma nedeniyle %28 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.

Yoon ve arkadaşları [84], Sn-Bi-In-Zn alaşım sistemlerinin termodinamik özelliklerini incelemişlerdir. Makale de indiyum değeri sabit tutularak bizmut oranları artırılmış, alaşımların erime davranışları araştırılmış ve lehim alaşımları için önem arz eden geçiş aralığı tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bizmut oranı arttıkça geçiş aralığının artış gösterdiği bildirilmiştir. Bu da lehim alaşımlarının geç katılaşması anlamına gelmektedir. İlgili makaleye göre bizmut oranının ağırlıkça %4 oranından fazla olmaması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Liu ve diğer yazarlar [91], Sn-Zn-Bi lehimlerinin erime sıcaklığının Sn-37Pb alaşımı ile karşılaştırıldığında biraz fazla olduğu ve ıslanma davranışlarının tatmin edici olmadığını bildirilmişlerdir. Bu nedenle, Sn-Zn lehim sisteminin daha düşük bir erime sıcaklığına ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra, bizmutun kırılğan doğası ve lehimlenen eklemin mekanik mukavemetinin azalmasına neden olabilecek ayrılması için güçlü eğilim nedeniyle bizmutun içeriğinin titizlikle kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bir diğer muhtemel alaşım elementi, düşük erime noktası, yüksek kaynama noktası ve mükemmel ıslanabilirlik nedeniyle en etkili elementlerden biri olarak da indiyum tanımlanmıştır. İncelenen makale de indiyum ilavesinin Sn-8Zn-3Bi kurşunsuz lehim alaşımlarının ısı özellik, mikroyapı, ıslanabilirlik ve ara yüzey reaksiyonları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, In ilavesinin, lehim alaşımlarının hem katı hem de sıvı akışkan sıcaklıklarını ıslanmaya karşı azaltılabileceğini göstermiştir.

Basaty ve arkadaşları [92], Sn-9.0Zn-0.5Al lehim alaşımının farklı ağırlık yüzdesi Sb (ağırlıkça %0.5, 1.0, 1.5) ilavelerinin mikroyapı, ısı davranış ve gerilme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Özellikle antimon artışıyla gerilmenin artış gösterdiği fakat sünekliği azalttığı vurgulanmıştır.

Yaygın olarak kullanılan Sn-40Pb ötektik lehim için kurşunsuz lehim alaşımıyla değiştirme ihtiyacını göz önüne alan Mc Cormack ve arkadaşları [93], büyük ölçüde aynı erime noktasına sahip yeni Sn-Zn-In bazlı alaşımların geliştirildiğinden bahsetmişlerdir. In'ın Sn-Zn ikili sistemine alaşım ilavelerinin, erime noktasının 175-188 °C'ye düşürülmesiyle sonuçlandığı ve aynı zamanda ıslatma özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir. Bir hava atmosferinde iyi lehimlenebilirlik için nispeten aktif bir eritken gerekli olabilirken, son zamanlardaki inert atmosferlerin kullanılması yönündeki üretim eğiliminin, daha az aktif değişiklikler kullanarak iyi bir üretilebilirlik sağlaması muhtemeldir.

Suganuma [94], kurşunsuz lehimlemenin çevreye duyarlı elektroniklerde montajı için anahtar teknolojilerden biri olarak ortaya çıktığını vurgulamıştır. Sn-Ag-Cu alaşım ailesinin içinde aday olan Sn-Cu ve Sn-Bi-Ag ve Sn-Zn-Bi gibi alaşımların kombinasyonları ilk tercih olduğuna inanılmıştır. CALPHAD yöntemi gibi termodinamik hesaplama ile birlikte dikkatli termal ve mikroyapısal analizler kullanılarak kurşunsuz alaşım sistemlerinin faz diyagramları yoğun bir şekilde incelenmiştir. Hem katı halde hem de lehimlemede intermetalik tabakaların büyüme kinetiği de tartışılmıştır. Sürünme ve yorulma olayları da gözden geçirilmiştir. Kurşunsuz lehimlemenin birçok alanında, uygulamalarını tanıtmak için sağlam bir bilimsel temel oluşturmak için çok daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu da vurgulanmıştır.

Zhang ve arkadaşları [95], alaşım elementleri taşıyan Sn-Zn lehimlerinin gelişimini ve Bi, Ag, Al, Ga gibi katkı elementlerinin ıslanabilirlik, oksidasyon direnci, erime noktaları, mekanik özellikler, sürünme özellikleri, mikro yapılar ve intermetalik bileşik katman (IML) üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir.

Saad ve arkadaşları [96], yeni nesil kurşunsuz lehimlerin tam olarak uygulanması için mekanik davranışları hakkında ayrıntılı bilgi ve anlayışın gerekliliğini vurgulamıştır. Çalışmalarında kullanılan malzemeler ağırlıkça Sn-%8.8Zn ve ağırlıkça Sn-%8.8Zn-%1.5Ag alaşımlarıdır. Sn esaslı alaşımlara Ag ilavesinin yumuşatma ve sertleştirme etkileri arasında, bu çalışma Ag ilavesinin, sıcaklığın ve uygulanan stresin Sn-8.8ağ.%Zn alaşımının sürünme özellikleri üzerindeki etkisi hakkında daha fazla bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte mikroyapısal değişiklikler, X-ışını kırınımı (XRD) analizi ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile araştırılmıştır.

Sn-9Zn bazlı kurşunsuz lehim alaşımının mikroyapısı, termal ve mekanik özellikleri üzerine az miktarda Bi eklenmesinin etkisi El-Daly ve arkadaşları [97] tarafından araştırılmıştır. Bi'nin eklenmesi Sn-9Zn lehim alaşımının hem erime noktasını ve hem de füzyon ısını düşürmüştür. Sn-9Zn-1Bi lehiminin sünekliği, yüksek sıcaklık aralığında Sn-9Zn ve Sn-9Zn-4Bi alaşımlarından daha yüksektir. Oysa ikili Sn-9Zn lehiminin, düşük sıcaklıklarda üçlü Sn-Zn-Bi lehimden çok daha yüksek süneklik sergilediği bildirilmiştir.

El-Daly ve arkadaşları [98], Sn-9Zn lehim bağlantılarının bütünlüğünü ve güvenilirliğini geliştirmek için Zn fazı miktarı azaltıldıktan sonra Ni ve Sb'nin ötektik Sn-Zn'ye

alaşımlanmasıyla ilişkili mikro yapılarda, termal davranışlarda ve mekanik özelliklerde meydana gelen değişiklikleri araştırmışlardır. Termal analiz, Ni ve Sb ilavelerinin aşırı soğuma miktarını azaltmada etkili olduğunu doğrularken, erime sıcaklığı ve macunsu aralığı ötektik altı Sn-6.5Zn seviyesinde kalmıştır. Ni ve Sb içeren Sn-6.5Zn alaşımları için, sadece Sn-6.5Zn lehimi ile karşılaştırıldığında, mikroyapıdaki Ni oluşumu sayesinde çekme dayanımı ve gerinim oranlarında süneklikte önemli iyileştirmeler gerçekleştirdiği bildirilmiştir.

Garcia ve arkadaşları [99], geleneksel Sn-40Pb lehim alaşımı yerine alternatif lehim malzemeleri olarak uygulama açısından Sn-Zn alaşımlarının temel özelliklerinin karşılaştırmalı deneysel bir çalışmasını bildirmişlerdir. Bir ötektik altı Sn-4ağ.%Zn, hiperötektik Sn-12ağ.%Zn ve ötektik Sn-9ağ.%Zn alaşımlarının katılaştırma işlemi sonrası elde edilen mikro yapıları, katılama termal parametreleri ve mekanik özellikleri (nihai gerilme mukavemeti ve uzama) incelenmiştir.

Negm ve arkadaşları [100], Sn-8Zn'nin üç ötektik civarındaki kurşunsuz lehim eriyiği; Sn-8Zn, Sn-8Zn-2Bi ve Sn-8Zn-4Bi alaşımları ara kademeli lehimleme için melt-spinning (eriterek savurma) tekniği aracılığıyla hızla katılaştırmışlardır. Bükülmüş şeritlerin termal ve çeşitli mekanik özellikleri, dinamik rezonans tekniği kullanılarak tavlama sıcaklıkları altında Vickers mikrosertlik testi ile araştırılmıştır. Diferansiyel termal analiz (DTA) tekniği kullanılarak alaşımların termal davranışları incelenmiştir.

Tablo 1.4. Bazı lehim alaşımlarının termal, elektriksel ve mekanik özellikleri.

Alaşım (% ağı.)	Isıl İletkenlik (K) W/Km	Erime Sıcaklığı (K)	Elektriksel İletkenlik (σ) ($10^8/\Omega m$) (oda sıcaklığı)	Mikrosertlik HV (kg/mm ²)	Çekme-Dayanım (σ) (MPa)
Sn-37Pb	50.90 [101] (303 K)	456 [101]	0.068 [101]	17 [101]	30.60 [101]
Sn-3.5Ag	84 [102] (483 K)	500 [101]	0.081 [103]		26.70 [104]
Sn-5Sb	43 [105] (519 K)	517.90 [101]	0.0058 [101]	17.20 [101]	35.20 [104]
Sn-58Bi		411 [101]	0.028-0.033[101]		60.40 [104]
Pb-5Sn	63 [101]	583 [101]	0.053 [101]		20.68 [101]
Sn-9Zn	88.34 [106] (300 K)	473 [107]	0.1-0.067 [101]	15.79±8 [108]	53.10 [101]
Sn-0.7Cu		500 [111]	0.1-0.067 [103]		22 [103]
Sn-2.8Ag-20In	53.50 [110] (300 K)		0.058 [110]		
Sn-2.5Ag-0.8Cu-0.5Sb	57.26 [111] (300 K)	488-490 [111]	0.083 [111]		46.88 [110]
Sn-3.8Ag-0.7Cu		490 [101]	0.077 [101]		48 [101]

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

Alaşımların termal, elektriksel ve mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla laboratuvarlarımızda yer alan deneysel sistemler bulunmaktadır.

Bu bölümde, alaşımı oluşturacak olan elementlerin eritilmesiyle kurşunsuz lehim alaşımlarının üretilmesi ve sonucunda üretilen malzemelerin ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik, erime davranışları, mikroyapı, mikrosertlik, çekme dayanım ve kristalografik özelliklerinin incelenmesinde kullanılan deneysel sistemler detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

2.1. Isıl İletkenliğin Tayininde Kullanılan Deneysel Sistemler

2.1.1. Kül Fırını

Laboratuvarda yapılan birçok deney ve prosedür aşırı sıcak ortamlar gerektirir. Bu amaçla yüksek sıcaklıklı kül fırınları laboratuvarın gerekli bir parçasıdır. Kül fırınının çalışma prensibi, termal konveksiyon ve termal radyasyonun temellerini kullanarak fırın odasının içindeki havayı ısıtmaktır. Fırının iç seramik odası, ısı kaybını önlemek ve yüksek sıcaklıklar elde etmek için geniş yalıtım katmanları ile sarılmıştır. Fırın içerisinde Nikrom (nikel-krom) teller bulunur. Elektrik yardımıyla nikel-krom ısıtıcı elemanları ısıtılarak fırının içerisindeki oda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılabilir. Fırın sıcaklığını ayarlamak ve düzenlemek elektronik kontrol ünitesinin verimliliğine büyük ölçüde bağlıdır. Ancak en iyi sonuçlar yalnızca *PID* (orantılı integral türev denetleyici) kontrollü üniteler uygulanarak elde edilebilir. Şekil 2.1 de yer alan kül fırını, maksimum 1100 °C de ısı verebilen, ± 2 °C hassaslıkla sıcaklık kontrolü yapan, 6.3 litre hacimde, 2 kW güce sahiptir. Alaşımların üretilmesinde *Erciyes Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı* 'nda bulunan *Protherm* marka 442 model kül fırını kullanılmıştır.



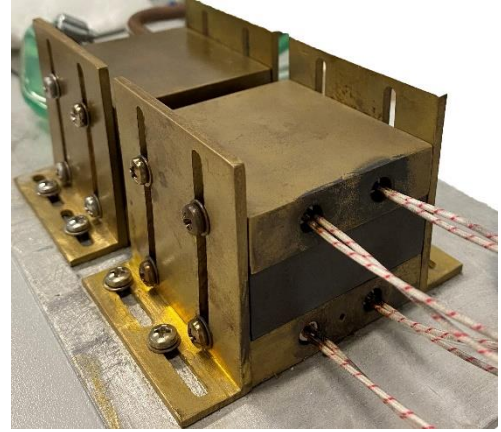
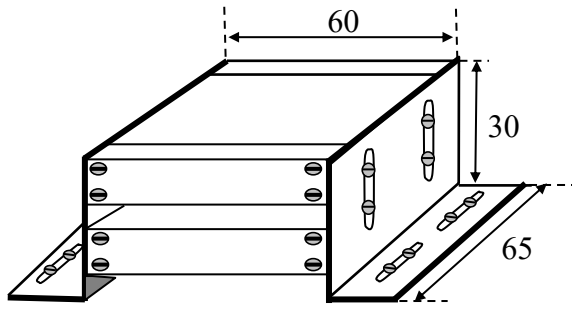
Şekil 2.1. Kül fırını.

2.1.2. Lineer Isı Akış Sistemi

Lineer ısı akış sistemi, metallerin ve alaşımların ısı iletkenlik katsayısını ölçebilmek için kullanılan yöntemlerden birisidir. Sistem; soğutucu, ısıtıcı ve numune tutucusu olmak üzere üç bölümden oluşur. Deney sırasında ısıtıcı ve soğutucu kısımların sıcaklıkları sabit tutulmalıdır. Ancak böyle bir durumda sabit sıcaklık gradyenti elde edilebilir. Lineer ısı akış sisteminin her bir bölümünü ayrı ayrı inceleyelim.

2.1.2.1. Isıtıcı Sistem

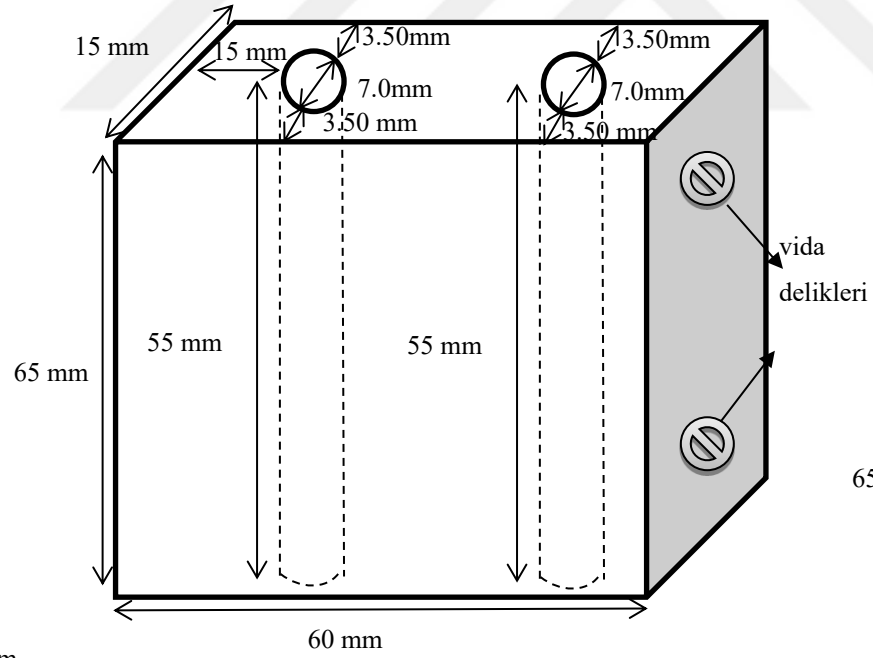
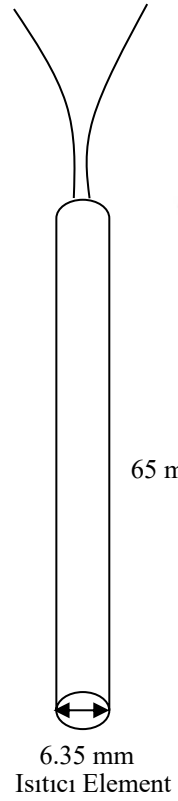
Isıtıcı sistem, Şekil 2.2 de görüldüğü gibi iki adet ana gövde, iki adet gövde tutucusu ve dört tane kapaktan meydana gelmektedir. Sistem, oksitlenmemesi, kolay işlenebilmesi ve yüksek sıcaklık iletimi nedeniyle pirinç malzemeden yapılır. Isıtıcı sistem 60x45x6 mm ebatlarında iki gövdeden oluşur.



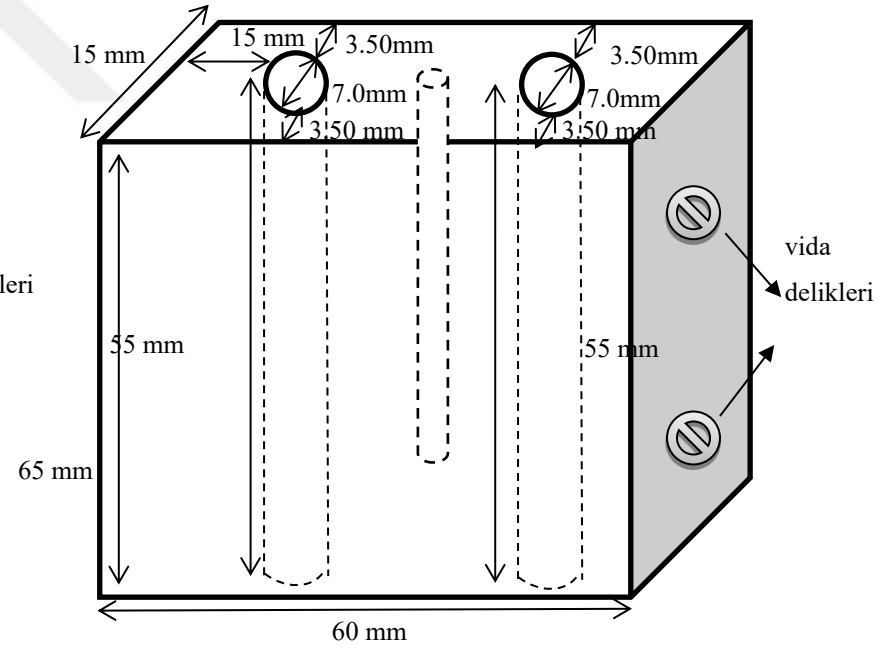
Şekil 2.2. Isıtıcı sistemin şematik gösterimi [30] ve fotoğrafı.

Şekil 2.3. de 60x65x30 mm ebatlarında, ön kısmı pirinç malzemeden oluşan, alt ve üst ısıtıcı elementler için 7 mm çapında yuvalar vardır. Alt ısıtıcı sistemin ısıtıcı elementlerin yuvalarının arasında 1.5 mm çap ve 35 mm uzunlukta, termal çiftin girebileceği bir delik yer alır. Buraya takılan termal çift sayesinde ısıtıcı sistemin sıcaklığı ölçülür. Isıtıcı sistemin numuneye tamamen temas etmesi ve ısı dağılımının homojen olması için alt ve üst ısıtıcı yüzeyleri parlatılmıştır.

Isıtıcı gövdeler arasındaki mesafeyi ayarlayabilmek ve sabitlemek için vida yuvaları mevcuttur. Isıtıcı blok, 130x310x5 mm ebatlarında metal bir tabla üzerine yerleştirilmiştir [30]. Sistemin alt tablasının metal olmasının sebebi yüksek sıcaklıklara olan dayanıklılığıdır. Isıtıcı sistemin sıcaklığı, ± 0.01 K aralığında hassas sıcaklık kontrolü yapabilen *Eurotherm* marka 2704 tipi sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilir. Isıtıcı sistem, 673 K sıcaklığa kadar dayanıklıdır.



(a)



(b)

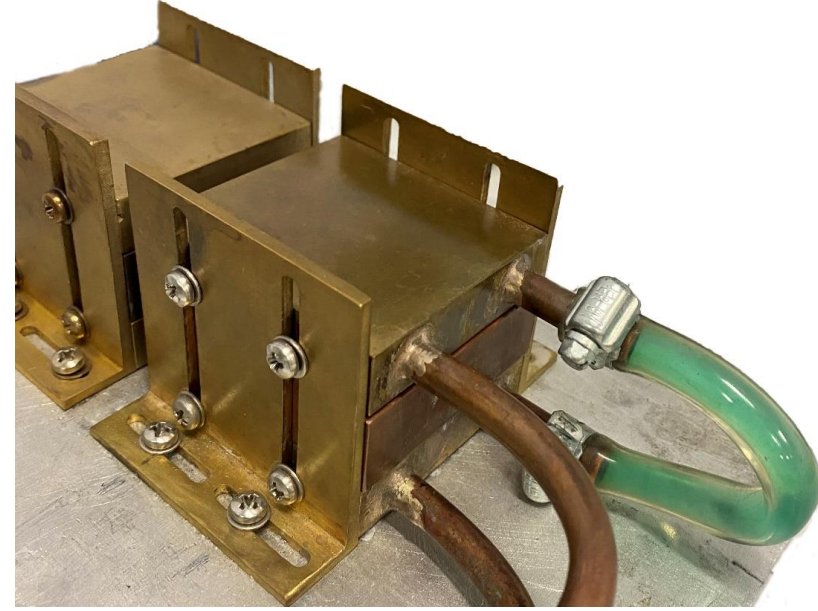
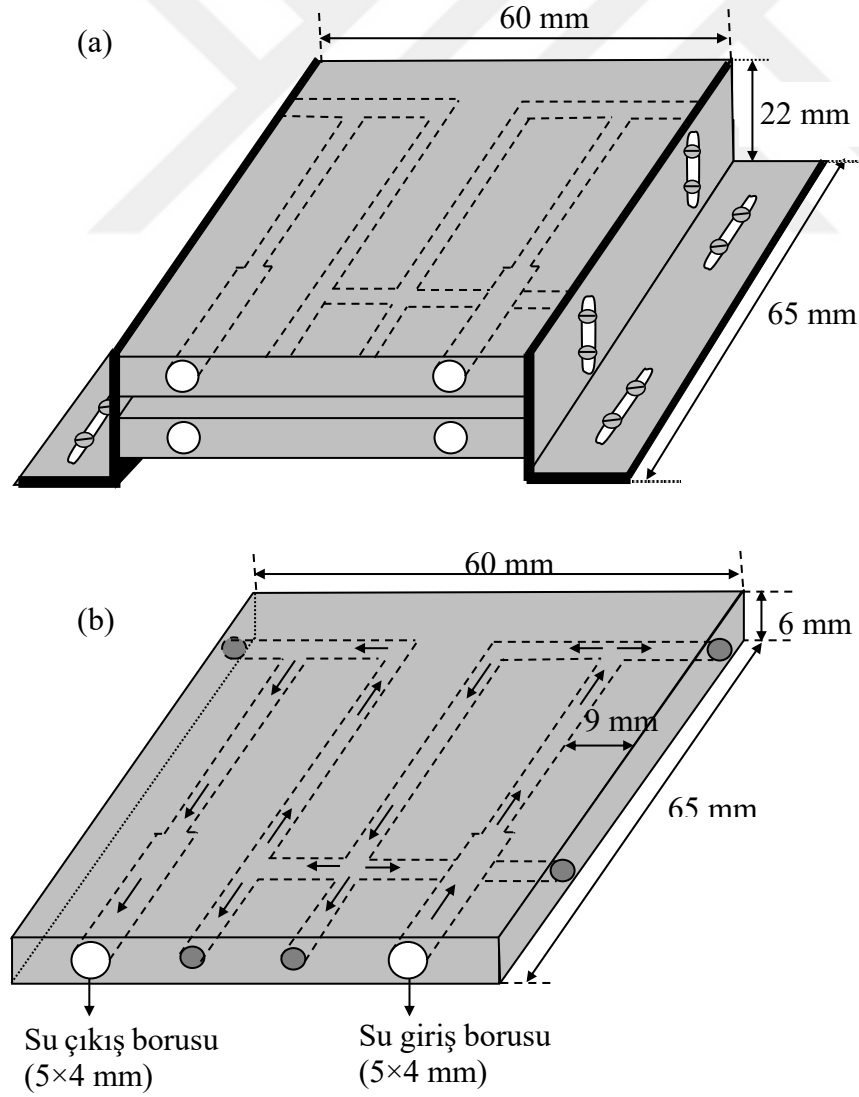
Şekil 2.3. Isıtıcı sistemin (a) üst ısıtıcı (b) alt ısıtıcı kısımları [30].

2.1.2.2. Soğutucu Sistem

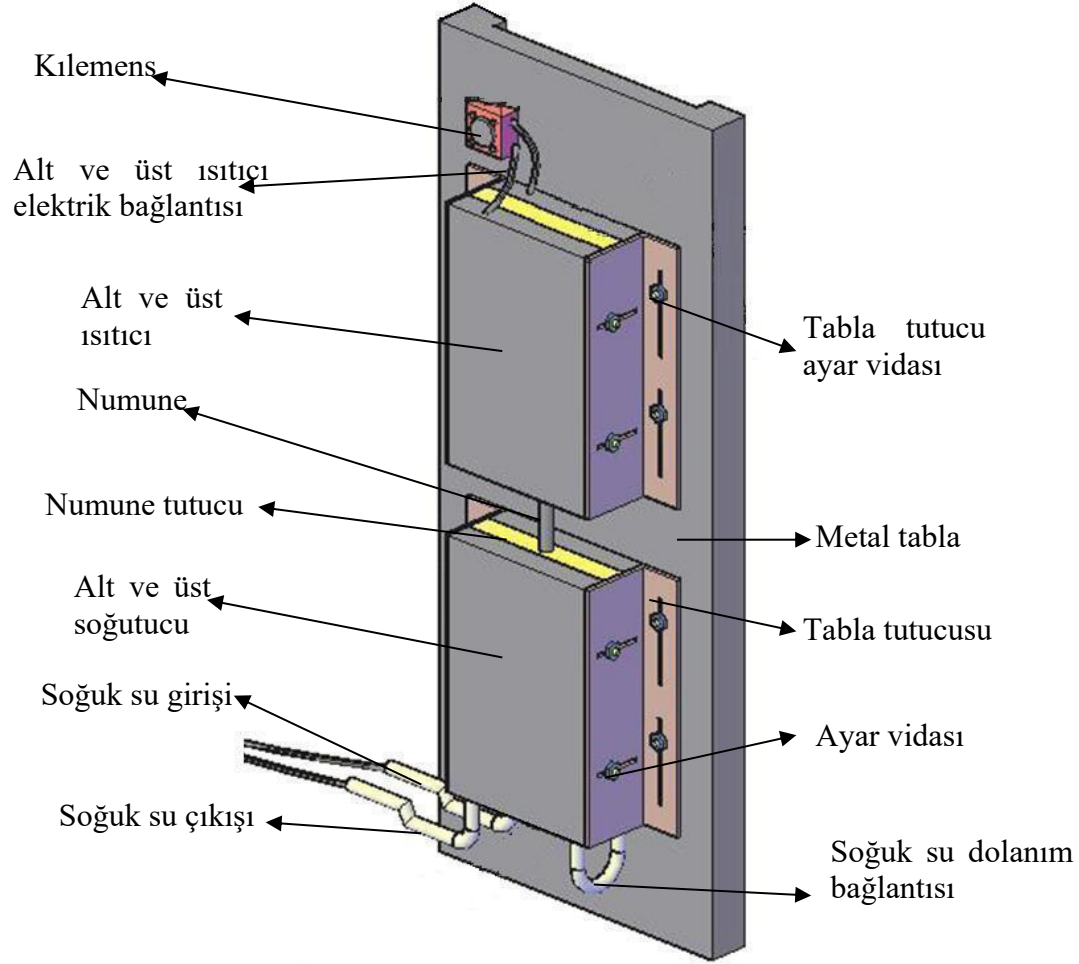
Soğutucu sistem, iki adet soğutucu gövde ve iki adet gövde tutucusundan oluşur (Şekil 2.4). Soğutucu gövde, 60x65x6 mm ebatlarında olup her blokta 5 mm çapında su giriş ve çıkış kanalı bulunan iki tane pirinç bloktan yapılmıştır. Homojen bir soğutma sağlamak için birbirine paralel konumda 4 mm çapında dört adet kanal vardır. Su kanalları oluşabilecek yüksek basınca ve su sızıntısına karşı kaynak yapılarak kapatılmıştır. Alt soğutucu ve üst soğutucu sistemlerin numune tutucusuna tam teması için temas noktaları parlatılmıştır. Suyun geçişini sağlamak için alt soğutucunun çıkışı ile üst soğutucunun girişi hortumla bağlanır. Böylece su devir-daimi yapılarak sistem homojen olarak soğutulmaktadır. Bu sayede numune sabit bir sıcaklık gradyentinde tutulmuş olur [30].

Şekil 2.5. de soğutucu gövdeleri alt tablaya tutturmak için 19x22x65 mm ölçülerinde pirinçten yapılmış köşebentler kullanılır. Bu köşebentler de ayarlanabilir vida kullanılarak soğutucu bloğa monte edilmiştir. Sonrasında soğutucu ve ısıtıcı sistem tabla üzerine yerleştirilerek sabitlenir. Şekil 2.6.'da soğutucu-ısıtıcı sisteminin şematik genel görünüşü yer almaktadır.

13 litre su kapasitesine sahip, -40 °C ile 200 °C arasında ± 0.01 °C sıcaklık hassasiyetiyle sıcaklık kontrolü yapabilen 9702 model PolyScience tipi dijital su dolanımıyla soğutucu sistemin sıcaklığı kontrol edilir. 12-25 litre/dakika pompalama ve 8-18 litre/dakika emme hızında su dolanımı sağlayan sistemi aynı zamanda dijital grafik gösterme özelliğine de sahiptir [30].



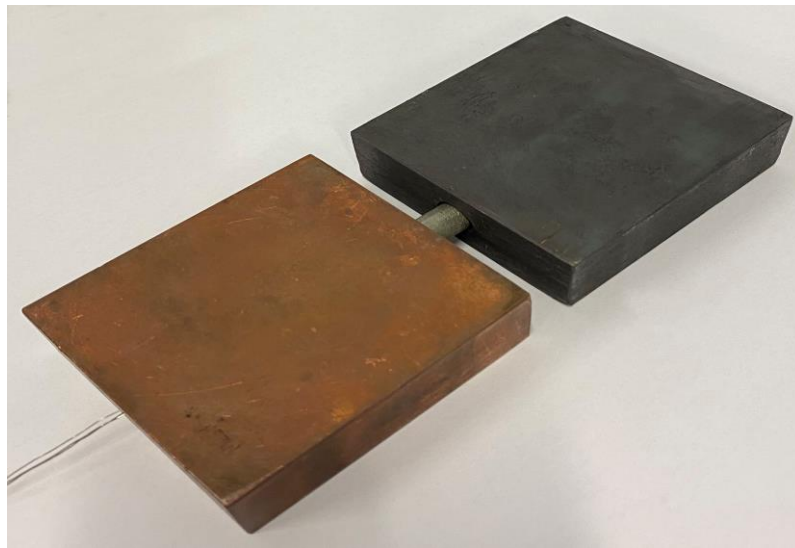
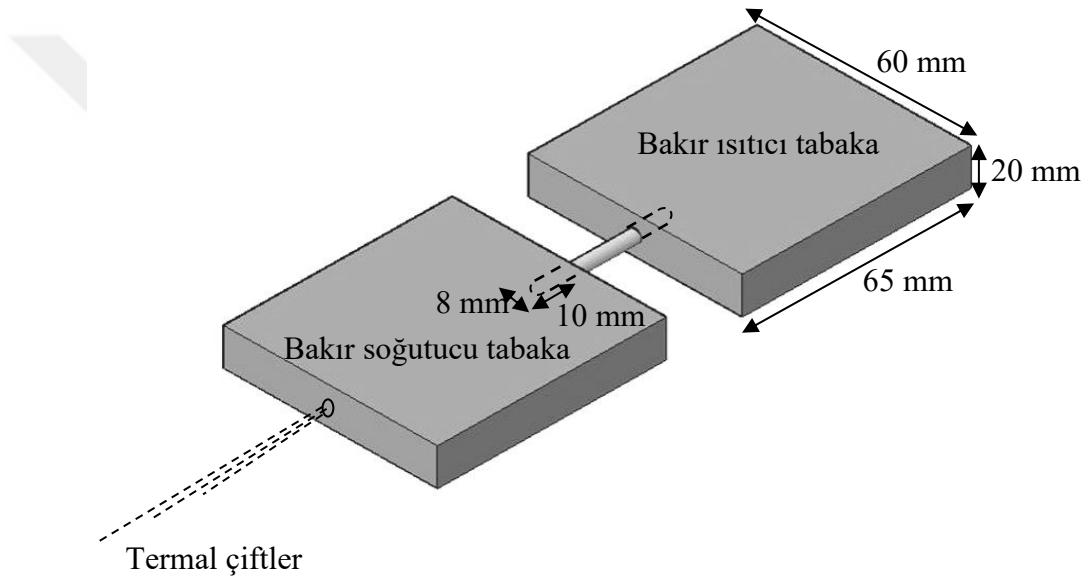
Şekil 2.4. (a) Soğutucu sistemin genel görünümü [30] (b) soğutucu bloğun şematik gösterimi [30] (c) soğutucu sistemin fotoğrafı.



Şekil 2.5. Soğutucu-ısıtıcılı sıcaklık gradyenti sisteminin genel görünüşü [81] ve fotoğrafı.

2.1.2.3. Numune Tutucu

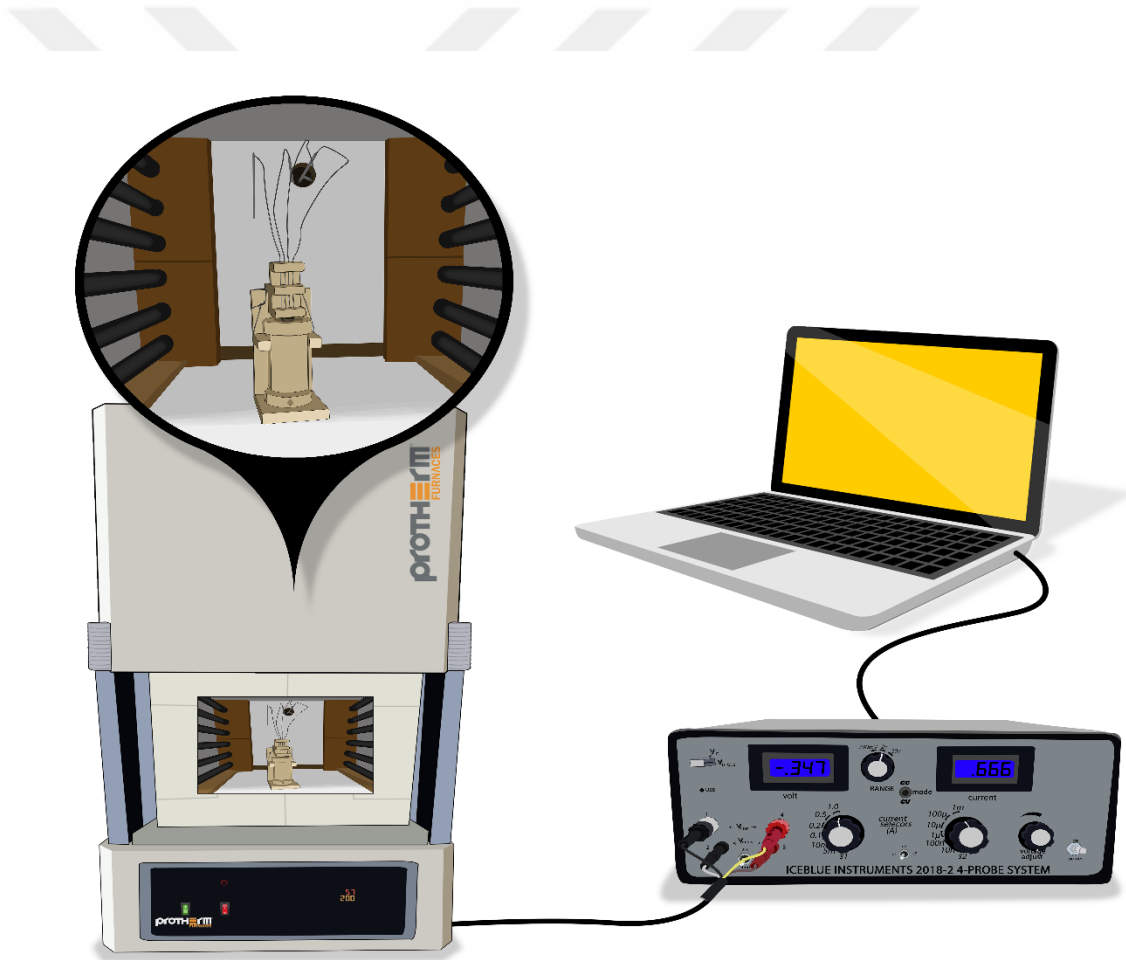
Numune tutucu Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi 65x60x20 mm ölçülerinde iki bakır tabakadan oluşur. Tutucuda bakır metalinin kullanılmasının sebebi hem erime noktasının hem de iletkenliğinin yüksek olmasıdır. Numune tutucu, ısı iletkenliği ölçülecek olan malzemeyi sıcak sistem ve soğuk sistem arasına yerleştirmek için kullanılır. Numune tutucularında 8 mm çapında ve 10 mm derinliğinde iki delik vardır. Termal çiftlerini numune içerisine yerleştirmek için soğutucu tabakanın arkasında 3 mm çapında delik mevcuttur [30].



Şekil 2.6. Numune tutucusunun şematik gösterimi [81] ve fotoğrafı.

2.2. Elektriksel İletkenliğin Tayininde Kullanılan Deneysel Sistemler

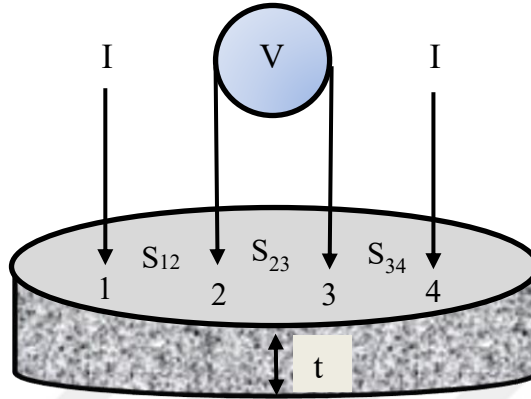
Elektriksel iletkenlik/öz direnç tayininde genellikle iki yöntem vardır. Bunlar; iki nokta elektriksel iletkenlik ölçüm metodu ve dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm metodudur. İki nokta ölçüm metodunda direnç değeri belirlenirken kontakların dirençleri de dâhil olmaktadır. Bu nedenle dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm metodu malzemenin doğrudan direnç değerini verdiği ilk tercih sebebi olmaktadır. Şekil 2.7 de dört nokta prob yöntemi kullanılarak tespit edilen elektriksel iletkenlik ölçüm düzeneğinin temel elemanları yer almaktadır. Sistem, kül fırını, dört nokta iletkenlik ölçüm cihazı, numune tutucu, fırın iç sıcaklığını okuyan termal çift ve bilgisayardan oluşur.



Şekil 2.7. Dört nokta prob yöntemi elektriksel iletkenlik temel elemanları.

I (akım) akışı numune üzerinde 1. kontakten başlayarak 4. kontağa doğru akar. Akım geçişi sırasındaki gerilim ise 2. ve 3. kontaklardan okunur. Şekil 2.8. de t kesitli bir

numunenin dört nokta iletkenlik ölçüm tekniği yer almaktadır. Problar arası mesafe s ile ifade edilir ve mesafeler birbirine eşittir ($s=s_{12}=s_{23}=s_{34}$). Numune kalınlığı ise t ile gösterilir.



Şekil 2.8. t kesitli numunenin dört nokta elektriksel iletkenlik ölçüm tekniği.

Bir numunenin elektriksel öz direncini (ρ) tayin etmek için, malzemenin geometrik özelliklerinin de bilinmesi gerekir. Elektriksel öz direnç Denklem 2.1 ile şu şekilde verilebilir:

$$\rho = \frac{V}{I} G \quad (2.1)$$

Burada G ; *geometrik düzeltme katsayısı/faktörü* olarak ifade edilir. Düzeltme faktörü, numunenin yüzey geometrik sınırlarına ve kalınlığına, problemlerin numune üzerindeki konumlarına ve kontakların diziliş düzenlerine göre değişir [112]. Numunenin farklı kalınlıklarda olması Denklem 2.1 de yer alan G düzeltme faktörünü değiştireceği için ölçülen öz direnç/iletkenlik değerlerini de farklı yapar. Numunenin kalınlığı ve yüzeyi göz önünde bulundurulduğunda düzeltme faktörünün hesaplanması için bazı formüller mevcuttur [113]. Elektriksel öz direnç/iletkenlik ölçümünde kullanılan numunelerin “*kalın daire*” sınıfına dâhil olduğu tespit edilmiş ve Denklem 2.2 yardımıyla her bir alaşımdan alınan kesit için ayrı ayrı düzeltme faktörü hesabı yapılmıştır.

d çapında t kalınlığına sahip kalın bir numunenin t kalınlığı küçük değilse yani $\frac{t}{s} \geq 0.5$ ise G düzeltme faktörü için Denklem 2.2 kullanılır.

$$G = 2\pi s F_1(t/s) F_2(d/s) \quad (2.2)$$

Denklem 2.3 ve 2.4 de ise F_1 ve F_2 ek düzeltme faktörleri yer almaktadır [113].

$$F_1(t/s) = \frac{t/s}{2 \ln \left(\frac{\sinh(t/s)}{\sinh(t/2s)} \right)} \quad (2.3)$$

$$F_2(d/s) = \frac{\ln 2}{\ln 2 + \ln \left(\frac{(d/s)^2 + 3}{(d/s)^2 - 3} \right)} \quad (2.4)$$

2.3. Entalpi, Isı Kapasitesi ve Erime Davranışlarının Belirlenmesi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı, ısıtma, soğutma veya izotermal döngüler boyunca meydana gelen enerji değişikliklerini izleyerek bir numune içinde meydana gelen fiziksel veya kimyasal tepkiyi analiz etmek için kullanılır. Analiz edilen maddeler içinde meydana gelen bir dizi kimyasal veya fiziksel değişikliği karakterize edebilir (erime, kristalleşme, cam geçişi, katı-katı geçişi, füzyon veya kristalleşme entalpisi, reaksiyon entalpisi, polimerizasyon ve piroliz). Bu geçişlerin çoğu ya ekzotermik ya da endotermiktir. Entalpi (ΔH) ve ısı kapasitesi (C_p) analiz sonucunda elde edilen eğrilerden hesaplanmaktadır.

DSC sistemlerinin yaygın tarama hızı genel olarak 10 °C/dk'dır. Sıcaklık ayarı, hassasiyet, analiz zamanı, kararlılık ve hal değişimi gibi faktörlere bağlı olarak tarama hızı değişiklik gösterebilir. Numunenin az veya fazla olan ağırlığı ölçümün doğruluğunu kısıtlayabilir. Bu yüzden inert (saf) gaz kullanılarak olası oksidasyon an aza indirilmiş olur. Numunelerin termal analizi Şekil 2.9 da gösterilen *Afyon Kocatepe Üniversitesi TUAM* da yer alan *NETZSCH STA 449F3* model cihazda yapılmıştır. Ölçümler yüksek saflıktaki argon gazı altında oda sıcaklığından 500 °C'ye kadar 10 °C/dak ısıtma hızında alınmıştır. Referans olarak boş kap kullanılmıştır. Elde edilen veriler 3. Bölüm de verilmiştir.



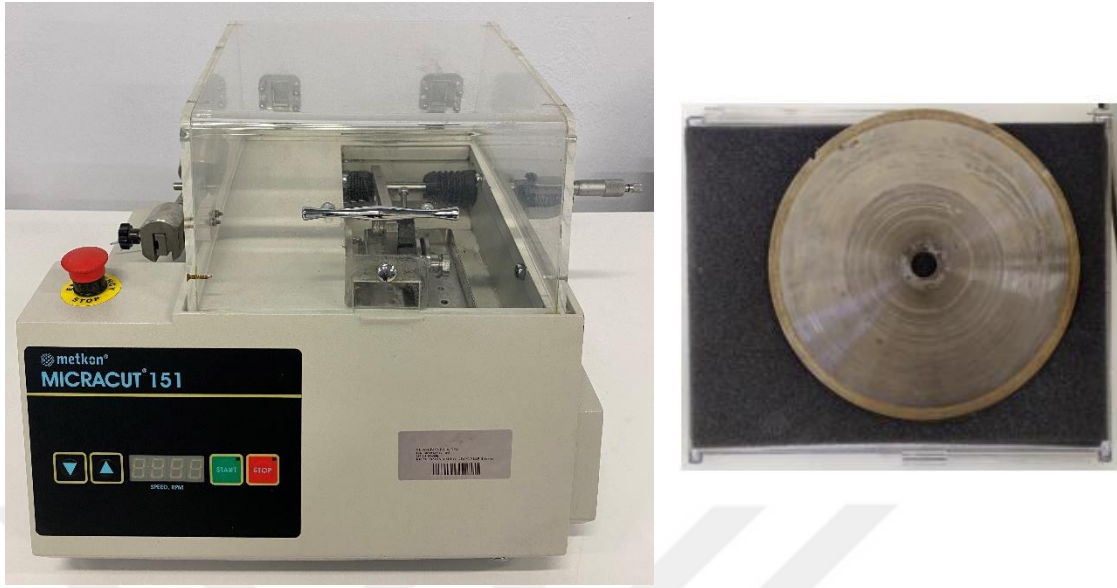
Şekil 2.9. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı.

2.4. Metalografik İşlemler

Üretilen lehim alaşımlarının fazlarının, kimyasal bileşimlerinin, mikrosertlik değerlerinin tayin edilebilmesi için mikroyapılarının gözlemlenebilmesi gerekir. Bunun için de numunelerin kesilmesi, kalıplanması, zımparalanması, parlatılması ve dağlanması gibi sıralı metalografik işlemlere tabi tutulması gerekir.

2.4.1. Numunelerin Kesilmesi ve Kalıplanması

Şekil 2.10 da numunelerin kesilmesi işleminde kullanılan *Metkon Micracut 151* kesme aleti yer almaktadır. Cihaz içerisinde 127 mm çap ve 0.4 mm kalınlığa sahip *Struers* elmas kesici kullanılmıştır. Numuneler ebatlarına uygun olarak tasarlanmış plastik kaplar içerisine yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Epoksi ve sertleştirici 7/1 oranında karıştırılarak kalıplar içerisinde olan numunelerin üzerine dökülmüş ve bir gün boyunca sertleşmeye bırakılmıştır. Kesilen numuneler soğuk kalıplama yöntemi ile kalıplanmıştır. Sertleşen epoksi-resin plastik kalıplar içerisinde çıkarılarak zımparalama ve parlatma işlemi için hazır hale getirilmiştir. Şekil 2.11 de döküm sonrası numuneler ve epoksi-resin ile kalıplanan numuneler yer almaktadır.



Şekil 2.10. Hassas kesme cihazı ve elmas kesici.



Şekil 2.11. (a) Dökümü sonrası numuneler (b) epoksi-resin ile kalıplanmış olan numuneler.

2.4.2. Numunelerin Zımparalanması ve Parlatılması

Zımparalama ve parlatma işlemi mikroyapı incelemesindeki en önemli metalografik basamaktır. Bu işlem manuel ya da otomatik olarak zımparalama ve parlatma yapan cihazlarında yapılır.

Zımparalama işlemi SiC (silisyum karbür) taneleri ve magnetit tozu bulunan zımpara kâğıtlarıyla yapılır. Zımpara kâğıtlarının incelik ve kalınlıklarını belirten kum değerleri

vardır. Kâğıtların üzerindeki numaralar kum değerlerini belirtir. 120-600 kumlar kaba, 800-2500 kumlar ince zımpara olarak adlandırılmaktadır.

Numunelere, dönüş hızı ve baskı basınç değeri ayarlanabilen *Mikrotest Multipol Advanced* (Şekil 2.12) marka otomatik zımparalama-parlatma cihazında 320 kum zımpara kâğıdı ile başlayarak 2000 kuma kadar, önce kaba sonra ince zımpara kâğıtlarıyla sulu zımpara yapılmıştır.



Şekil 2.12. Zımparalama-parlatma cihazı.

Kaba zımparalamadan başlayıp ince zımparalamaya kadar yapılan işlemde numune yüzeyindeki çiziklerin en aza indirilmiş ya da tamamen giderilmiş olmasına dikkat edilmiştir. Daha sonra, numunelere uygun olan parlatma kumaşları takılmış ve sırasıyla 6 μm , 3 μm , 1 μm , 0.25 μm tane büyüklüklerine sahip elmas süspansiyonlar kullanılmıştır. Parlatma işlemi sırasında kumaşın kuruluğunu azaltmak ve yumuşak bir temas sağlamak amacıyla zaman zaman yağlayıcı (lubrikant) ile yağlanmıştır. Numuneler kalay esaslı yumuşak malzeme olduklarından dolayı 10-20 N arasında hassas baskı uygulanmış ve her bir süspansiyonda 14'er dakika 150 rpm hızında parlatma işlemi yapılmıştır.

2.4.3. Numunelerin Dağlanması

Numune yüzeyi pürüzsüz ve parlak olsa bile yüzeyde kontrast oluşturmadan detaylı inceleme yapılamaz. Bu yüzden mikroyapı incelemesi için numune yüzeyinin dağlanması gerekir. Dağlama işleminden sonra mikroyapı karakteristikleri ortaya çıkar. Kimyasal ve elektrolitik olmak üzere metalografide iki tür dağlama mevcuttur. Elektrolitik dağlamayla yüzeyde oluşan atom tabakaları ısı ya da yüksek voltaj uygulanarak oluşan enerjiyle atılır. Kimyasal dağlama ise uygun bir çözelti hazırlanılarak numunenin yüzeyine uygulanmasıdır. Dağlama da önemli olan husus malzeme için uygun olan dağlayıcıyı seçmektir [114]. Aksi takdirde mikroyapı incelemesi gerçekleştirilemez.

Bu tez çalışmasında, numunelere kimyasal dağlama yapılmıştır. Kimyasal dağlama, zımparalanmış ve iyice parlatılmış olan yüzeye kimyasal enerji vererek mikroyapının açığa çıkmasıdır. Numune içeriğine uygun dağlayıcı reçeteleri vardır. Dağlayıcı belirlendikten sonra numune çözelti içerisine daldırılır ve reçete de belirtilen süre içerisinde bekletilir. Süre belirtilmeyen durumlarda ise kademeli sürelerde ilerlemekte fayda vardır. Dağlayıcı süresinin yeterli olup olmadığı mikroskopla incelenen mikroyapıya bakılarak belirlenebilir. Tane sınırlarının, fazların belirginleşmesi dağlamanın yeterli olduğunun işaretidir.

Çalışma da yer alan alaşımlar için metalografi kaynaklarından faydalanılarak en uygun olabilecek dağlayıcı seçilmiştir. Numuneler, 80 ml gliserin ($C_3H_8O_3$), 10 ml asetik asit (CH_3COOH) ve 10 ml nitrik asitten (HNO_3) oluşan çözeltiyle 10 s süreyle dağlanmıştır.

2.5. Mikroyapı İncelemesi

Üretilen numunelerin her biri mikroyapı tayini için metalografik işlemlerden geçirildikten sonra önce optik mikroskop sonra da taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı olarak incelenmiştir. Optik mikroskop yardımıyla mikroyapı incelemesi sonucunda fazların netliğinden emin olduktan sonra SEM mikroskobuyla fotoğraf çekimi yapılmış ve fazların kimyasal bileşimleri belirlenmiştir.

2.5.1. Optik Mikroskopla İnceleme

Numunelerin optik görüntü incelemesi *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mikroskopi Laboratuvarı*'nda yapılmıştır. Şekil 2.13 de farklı büyüklükte objektifleri olan *Nikon Eclipse MA 100* tipi ışık mikroskobu ve *Clemex* tipi dijital kamera monte edilmiş görüntü sistemi yer almaktadır.



Şekil 2.13. Optik mikroskop görüntü sistemi.

2.5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu ile İnceleme (SEM)

Numunelerin optik görüntü incelemesi sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı mikroyapı incelemesi ve belirlene fazların kimyasal bileşim analizi yapılmıştır.

Üretilen numunelerin SEM mikroyapı incelemesiyle çekilen fotoğrafları *Erciyes Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezinde (TAUM)* da bulunan *ZEISS GEMINI 500* model bilgisayar kontrollü dijital taramalı elektron mikroskobuyla yapılmıştır. Şekil 2.14 de SEM mikroskobunun fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 2.14. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) fotoğrafı [115].

Taramalı elektron mikroskobu ile fotoğraf çekmeden önce zımparalanmış, parlatılmış ve dağlanmış olan numuneler Au/Pd ve karbon kaplama cihazında yaklaşık 10-40 nm inceliğinde kaplanmıştır. Numune yüzeyine yapılan kaplama sayesinde elektron demetleri numune yüzeyinden daha iyi saçılır ve böylelikle daha net görüntü elde edilir.

SEM fotoğrafları alırken eş zamanlı olarak tespit edilen fazların kimyasal bileşim analizi de yapılmaktadır. Cihaz da EDX dedektörü ile elementel içerik noktasal ya da çizgisel olarak tespit edilmektedir. Farklı bölgelerden birden fazla fotoğraf çekilmiş ve fazların kimyasal içerikleri Bölüm 3 de ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

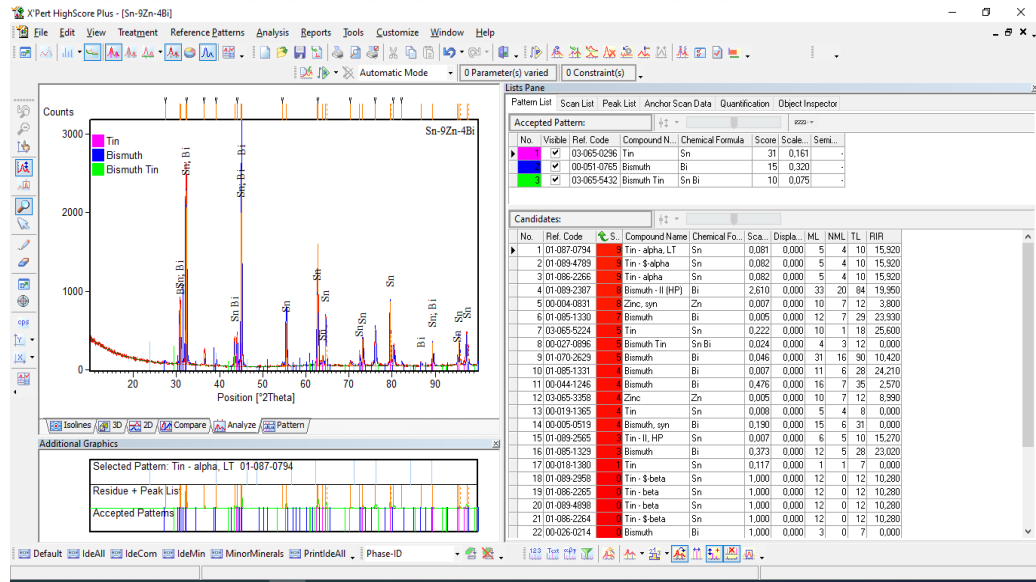
2.6. X-Işınları Toz Difraktometresi (XRD)

X-ışınları toz difraktometresi (XRD) analizleri *Erciyes Üniversitesi TAUM*'da yer alan bilgisayar kontrollü *Panalytical* marka *Empyrean* model cihazda yapılmıştır (Şekil 2.15).

XRD analizi Bragg yasasına göre çalışan, difraktometresi olan bir sistemdir. Ölçümlerde 36 kV ve 36 mA'de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) ışınması kullanıldı. XRD analizinden elde edilen verilerin yorumlanması, literatür karşılaştırması, örgü parametreleri, indislemeleri gibi pek çok inceleme *X'Pert HighScore Plus* hazır paket programı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2.16). Örgü sabitleri ve düzlemler gibi işlemleri program otomatik olarak gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.15. XRD sisteminin fotoğrafı [115].



Şekil 2.16. XRD sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan X'Pert HighScore Plus programından alınan fotoğraf.

2.7. Öğütme İşlemi

Alaşımların öğütme işlemi *Erciyes Üniversitesi TAUM* da *Freezer/Mill* marka 6770 model cihazda yapılmıştır (Şekil 2.17). Cihaz, 0.1-5 gram arasındaki numuneleri barındıran kompakt bir kriyojenik öğütücüdür.



Şekil 2.17. Kriyojenik öğütücü fotoğrafı [115].

Numuneleri önceden soğutan, öğüten ve bir küçük öğütme şişesi seti tutabilen çift amaçlı bir bölmesi vardır. Numune şişesi, sıvı azota sürekli daldırma nedeniyle kriyojenik sıcaklıkları korur. Isıya duyarlı metabolitler, izomerler ve kompleks moleküller, ısı veya basınçla bozulmadıkları için bileşimlerini korurlar. Öğütme şişesi setleri (Şekil 2.18), polikarbonat, paslanmaz çelik ve düşük kromlu çelik dâhil olmak üzere çeşitli malzemelerde sunulmaktadır. Numune, çelik ve tıpalara karşı manyetik olarak ileri geri hareket eden çelik çarpma tertibatı tarafından toz haline getirilir.



Şekil 2.18. Öğütme şişesi seti.

Öğütme işlemi yapılmadan önce numuneler çok küçük parçalara ayrılmıştır. Tüm alaşımlar yaklaşık 3.40 gram olarak hassas terazide tartılmıştır. Küçük parçalar halindeki numuneler sırasıyla öğütme cihazında toz haline getirilmiştir. Öğütme işleminin yapıldığı tüp içerisinde HSS çeliği kullanılmıştır. Öğütme işleminde devir sayısı hariç tüm parametreler sabit tutulmuştur. Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb ve Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımları için devir sayısı sırasıyla 5 ve 6 rpm olarak ayarlanmıştır. Öğütme sonrası çelik üzerinde kalan toz parçacıklar Şekil 2.19 de gösterilmiştir. Şekil 2.20 (a) da öğütme işlemi öncesindeki küçük parçalara ayrılmış numune ve Şekil 2.20 (b) de ise öğütme sonrasındaki toz haline getirilmiş olan kurşunsuz lehim alaşımı gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Öğütme sonrası çelik üzerinde kalan toz parçacıkları.



Şekil 2.20. (a) Öğütme işlemi öncesi alaşım (b) öğütme işlemi sonrası toz alaşım.

2.8. Parçacık Boyut Ölçümü

Zeta potansiyeli, malzemenin taneleri arasındaki itme ya da çekme değerinin ölçümüdür. Başka bir deyişle, hareketli dağılım ortamı ile dağılmış parçacığa bağlı dağılım ortamının sabit tabakası arasındaki potansiyel farktır. Belirli bir yüke sahip parçacık, süspansiyon içinde zıt yükteki iyonları çeker, sonuçta, yüklü parçacıkların yüzeyinde güçlü bir bağ oluşturur. Sonrasında yüklü olan tanenin yüzeyinden dışarıya doğru bir yüzey yayılır. Yayılmış yüzey içinde "*kayma yüzeyi*" olarak isimlendirilen bir sınır vardır. Tanedeki iyonlar, kayma yüzey sınırına kadar bütün bir parça olarak yol alır. Bu kayma yüzeyinde oluşan potansiyel zeta potansiyelidir. Tanenin yüzey yapısından ve içinde bulunduğu sıvıdan etkilenir.

Zeta potansiyel ölçümünün yanı sıra cihazda tanecik boyutu da belirlenmektedir. Numuneye mavi ve kırmızı lazer ışığı gönderilir. Malzemeden kırılan ve yansıyan lazer ışığı dedektörlerle incelenir. Numunenin parçacık boyut dağılımını saçılan ışığın şiddeti ve açısı belirler. Işığın saçılma açısı parçacığın boyutuna bağlı olarak değişir. Parçacık boyutunun düşmesi saçılma açısını logaritmik olarak artırır. Büyük boyutta olan parçacıklar düşük açılarda saçılırsa, yüksek şiddette lazer ışığı saçılır. Küçük boyutta olan parçacıklarda ise durum tam tersidir.

Bu tez çalışmasında da cihazın tanecik boyutu belirleme özelliğinden faydalanılmıştır. Toz haline getirilen numunelerin parçacık boyut analizi *Erciyes Üniversitesi ERNAM*'da *Malveren Zetasizer* marka zeta potansiyel ölçüm cihazında yapılmıştır. Toz haline getirilen numunelerin parçacık boyutları 3. Bölümde verilmiştir.

2.9. Mekanik Özelliklerin Tayininde Kullanılan Deneysel Sistemler

Malzemelerin mekanik davranışları hakkında bilgi edinmenin pek çok yöntemi vardır. Sertlik ve çekme deneyleri başta gelen mekanik deneylerdir. Tez çalışmasında alaşımların mikrosertlik ve çekme deneyleri incelenmiştir.

2.9.1. Mikrosertlik Değerlerinin Belirlenmesi

Numunelerin mikroyapı incelemesinden sonra mikrosertlik testine geçilmiştir. Alaşımlar, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mikroskopi Laboratuvarı* 'nda Şekil 2.21 de yer alan *Future Tech FM-700* model dijital sertlik ölçüm cihazında mikrosertlik testine tabi tutulmuştur.

Vickers sertlik ölçümü, yüzeyleri arasında 360° açı bulunduran bir elmas piramit uç yardımıyla yapılır. Deney sırasında 10-1000 g arasında yük uygulanmaktadır. Piramit uç, numune yüzeyine belirlenen bir kuvveti 5-10 saniye aralığında uygulayarak bir iz oluşturur. Oluşan bu izin köşegenlerinin boyutları (d), cihazın mikroskobundan belirlenir. Bu cihaz %5 hassasiyete sahip olup, sertlik değerini doğrudan veren bir cihazdır. Mikrosertlik ölçüm metodu darbelere karşı daha hassas olduğu için en sert malzemelerin sertlikleri bile kolaylıkla ölçülebilmektedir [116].



Şekil 2.21. Mikrosertlik ölçüm cihazı [116].

2.9.2. Çekme-Dayanım Değerlerinin Belirlenmesi

Belirli standartlara uygun olarak farklı kesit ve ebatlarda numune üretimleriyle çekme-dayanım deneyleri gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışmasında yuvarlak kesitli numune üretilmiştir. 4 mm çaplı ve 40 mm uzunluğunda ince silindirik şekilde üretilen numuneler çekme-dayanım analizi için hazır edilmiştir.

Üretilen alaşımların çekme-dayanım ölçümleri, *Erciyes Üniversitesi TAUM* da yer alan ISO 7500/1, ASTM E4, DIN51221 standartlarına göre 50kN-50N aralığında $\pm\%0.1$ hassasiyetli okuma yapabilen *Shimadzu* marka çekme-dayanım test cihazında belirlenmiştir (Şekil 2.22). Test sonucunda elde edilen oda sıcaklığındaki gerilme-uzama eğrilerinin sonuçları detaylı olarak 3. Bölüm de yer almaktadır.



Şekil 2.22. Çekme-dayanımı test ölçüm cihazının fotoğrafı [115].

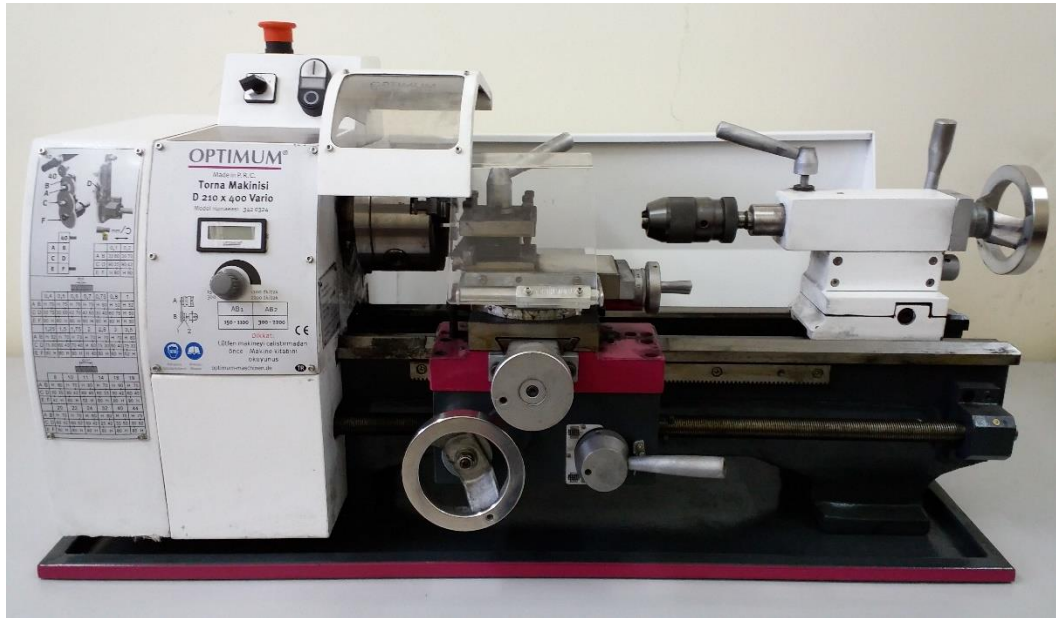
2.10. Isıl İletkenliğin Ölçümü için Bir Deneyin Yapılışı

2.10.1. Numune Kalıbının Hazırlanması

Pota, huni ve numune kalıplarının yapımı için grafitler kullanılmıştır. Grafit, malzemeler arasında en yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemeler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Grafit, düşük yoğunluklu, yüksek ısı iletkenliği ve mükemmel ısı yalıtımı malzemesi olarak uygun işlenebilirlik özelliklerine sahiptir. Doğal kristal grafitin (002) kristal düzlemindeki ısı iletkenliğinin oda sıcaklığında 2200 W/mK'ye ulaşabileceği ve tek

kristal grafitin 80 K'de maksimum 2800 W/mK'lık bir maksimum düzlemsel ısı iletkenliğine sahip olduğu bildirilmiştir [117, 118]. Bu sebeplerden dolayı döküm aşamasında hem yüksek sıcaklığa dayanıklı hem de metallerle etkileşime girmeyeceği için grafit malzeme seçilmiştir.

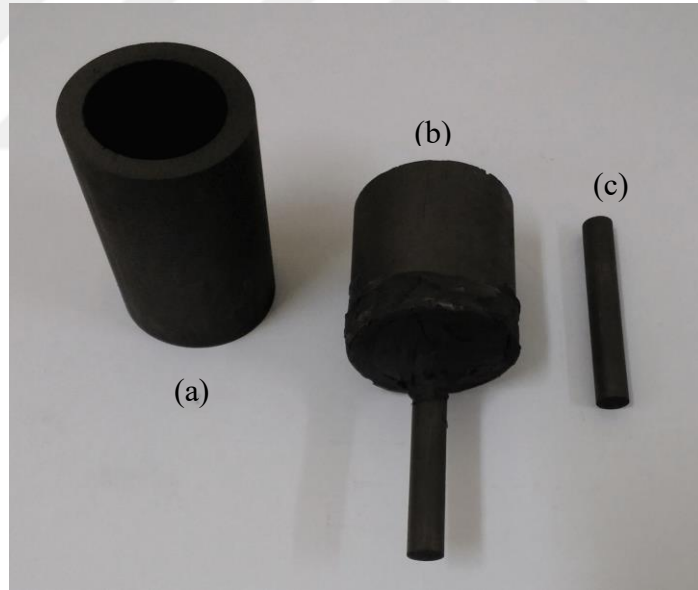
Grafitlerin işlenmesi için Şekil 2.23 de *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fizik Laboratuvarı*'nda yer alan *Optimum* marka masaüstü torna tezgâhı kullanılmıştır. Pota, saf elementlerin ergitilerek alaşım haline getirildiği torna da işlenmiş grafit tir. Şekil 2.24 (a) da gösterilen 35x600 mm ebatlarında tek çubuk halinde temin edilmiş olan grafit, masaüstü torna tezgâhında 30 mm çapında 60 mm boyunda işlenmesiyle elde edilmiştir. Huni, dökümü yapılacak alaşımların numune kalıbına kolaylıkla doldurulmasını sağlayan işlenmiş grafit tir. Şekil 2.24 (b) de gösterilen huni 35x600 mm ebatlarında tek çubuk halinde temin edilmiş ve grafit çubuk masaüstü torna tezgâhında önce 8 mm çapında matkap ucuyla yaklaşık 20 mm uzunluğunda delinmiştir. Daha sonra 30 mm çapında 30 mm boyunda işlenerek yüksek sıcaklığa dayanıklı siyah silikon yardımıyla numune kalıbıyla birleştirilmiştir.



Şekil 2.23. Masaüstü torna tezgâhı.

Numune kalıbı, ısı iletkenlik ölçümü için oluşturulacak alaşımların silindirik formda katılaştığı grafit çubuktur (Şekil 2.24 (c)). 12 mm çap ve 250 mm uzunluğundaki grafit

Çubuklar tornada işlenmiştir. Isıl iletkenlik ölçümünde numunede termal çiftlerin yerleşimi için alümina tüp kullanılmaktadır. Bunun için öncelikle 33 mm uzunluğunda iki ucu açık çapı 1.2 mm olan alümina tüpün bir ucu şekil 2.25 deki oksijen kaynağı yardımıyla kapatılmıştır. Dış apı 12 mm olan grafit çubuktan boyu 50 mm olacak şekilde parçalar kesilmiştir. Kesilen parçanın (numune kalıbı) bir ucu alümina tüp için çapı 1.2 mm'lik matkap ucuyla delinmiştir. Daha sonra diğer ucundan çapı 8 mm olan matkap ucuyla yaklaşık 50 mm delik açılmıştır. Alümina tüpün kapalı ucu numune kalıbının içinde ve açık ucun 5 mm'lik kısmı kalıbın dışında kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Garfit numune kalıbıyla st destek hunisi arasında oluşan boşuklar, döküm esnasında oluşabilecek sızıntıları önlemek amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı silikonla kapatılmış ve kuruması için birkaç saat bekletilmiştir. Numune kalıbı fotoğrafı ve şematik gösterimiyle detaylandırılarak şekil 2.26 de gösterilmiştir.



şekil 2.24. Pota, huni ve numune kalıbının fotoğrafı.

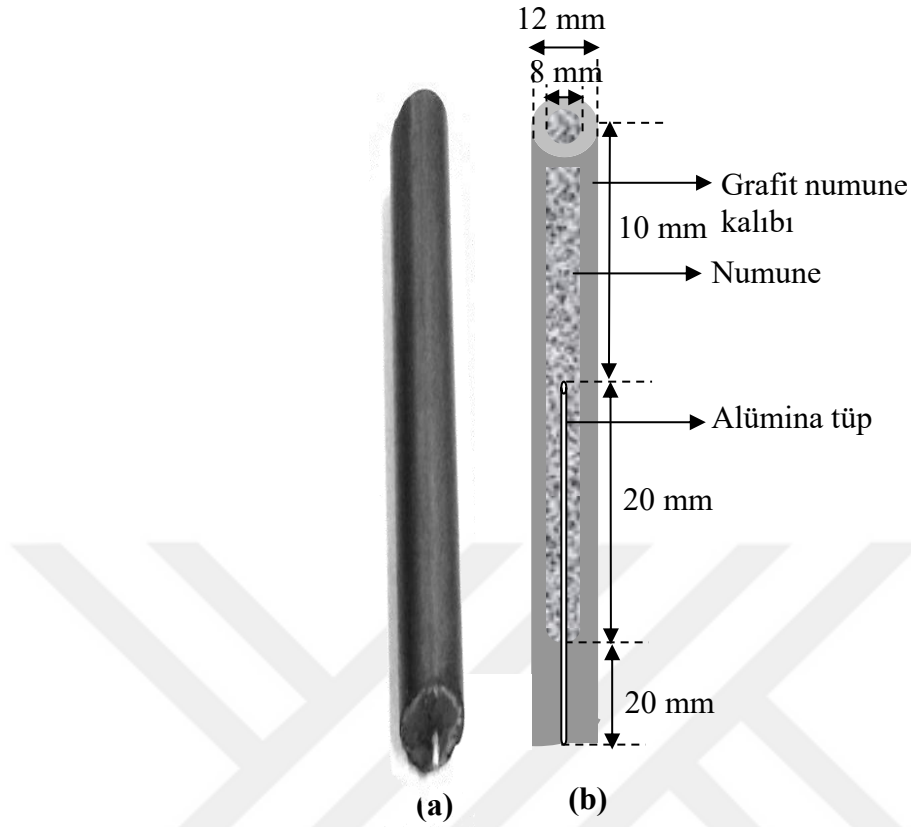


Şekil 2.25. Oksijen kaynağı yardımıyla alümina tüpün kapatılması.

2.10.2. Alaşımların Oluşturulması

2.10.2.1. Döküm Hesabı

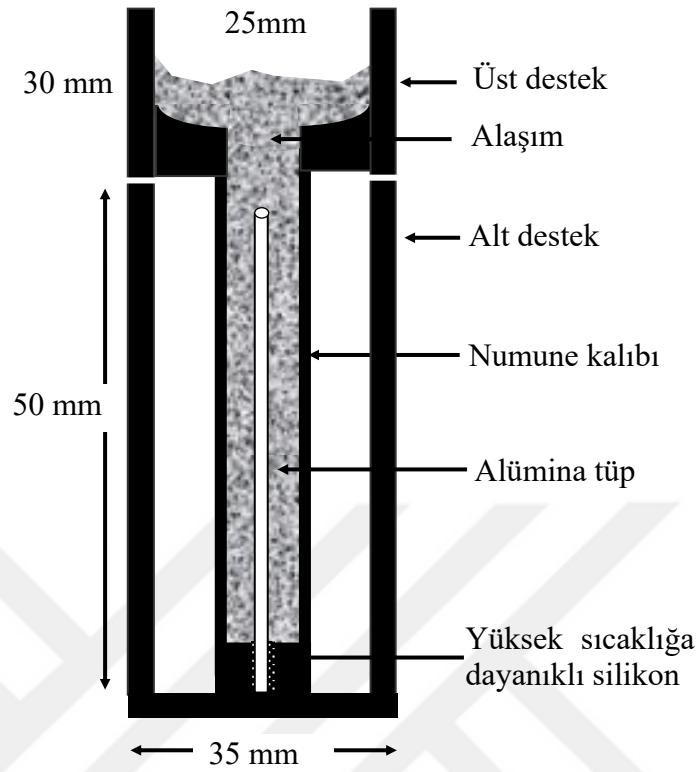
Masaüstü torna tezgâhında işlenen numune kalıbının ölçüsüne göre silindirin hacim hesabı kullanılarak ısıl iletkenlik için hacim hesabı yapılmıştır. Ağırlıkça yüzde oranları Tablo 2.1 de yer alan elementlerin gram miktarının belirlenmesi için öncelikle yoğunluklarının bilinmesi gerekir ($d_{Sn}=7.265 \text{ g/cm}^3$, $d_{Zn}= 7.14 \text{ g/cm}^3$, $d_{Bi}= 9.79 \text{ g/cm}^3$, $d_{Sb}= 6.697 \text{ g/cm}^3$, $d_{In}=7.31 \text{ g/cm}^3$). Böylelikle her bir elementin alaşımdaki yüzde hacmi belirlenir. Grafit numune kalıbının hacminin hesaplanan toplam yüzde hacmine oranı bir katsayı verir. Bu katsayı yardımıyla da her bir elementin oluşturacakları alaşımdaki gram biriminde miktarı belirlenir. Bu döküm hesabı her bir malzeme için tek tek yapılmıştır. Tablo 2.1 de her bir alaşımin ısıl iletkenlik için yüzde hacim oranları verilmiştir.



Şekil 2.26. Isıl iletkenlik numune kalıbının (a) fotoğrafı (b) şematik gösterimi.

Tablo 2.1. Alaşımların yüzde hacimsel oranları.

Alaşım (ağ.%)	Yüzde Hacimsel Oran (% cm ³)			
87Sn-9Zn-4Bi	V _{Sn} =11.975	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	
86.5Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb	V _{Sn} =11.906	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	V _{Sb} =0.075
86Sn-9Zn-4Bi-1Sb	V _{Sn} =11.838	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	V _{Sb} =0.149
85.5Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb	V _{Sn} =11.769	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	V _{Sb} =0.224
85Sn-9Zn-4Bi-2Sb	V _{Sn} =11.700	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	V _{Sb} =0.299
86.5Sn-9Zn-4Bi-0.5In	V _{Sn} =11.906	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	V _{In} =0.068
86Sn-9Zn-4Bi-1In	V _{Sn} =11.838	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	V _{In} =0.137
85.5Sn-9Zn-4Bi-1.5In	V _{Sn} =11.769	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	V _{In} =0.205
85Sn-9Zn-4Bi-2In	V _{Sn} =11.700	V _{Zn} =1.260	V _{Bi} =0.409	V _{In} =0.274



Şekil 2.28. Numune potasının şematik gösterimi.

2.10.3. Numunelerin Lineer Isı Akış Sistemine Yerleştirilmesi

30 mm uzunlukta olan numunenin, 10 mm uzunlukta olan iki ucunun biri sıcak diğeri ise soğuk numune tutucusunda yer alan oyuklara sıkıca yerleştirilmiştir. Numunenin 10 mm'lik kalan orta kısmı ise lineer sıcaklık gradyenti oluşturmak ve radyal ısı kaybı oluşmaması için açıkta bırakılmıştır. Daha sonra bakır tabakalar soğutucu ve ısıtıcı sistem içine yerleştirilmiştir. Numunenin farklı uç bölümündeki sıcaklığı ölçmek için termal çift kullanılmıştır. Termal çift; iki farklı iletken telin bileşiminden oluşur ve sıcaklığı ölçmek için kullanılan iletken bir tel çiftidir. Termal çift, fırınlar başta olmak üzere ısıtılan birçok maddenin sıcaklıklarının hassas olarak ölçülmesinde ve cihaz içi sıcaklığının kontrolünün yapıldığı cihazlarda kullanılır. Lineer ısı akış sisteminde düşük sıcaklıklarda kullanımı uygun olan K tipi termal çiftleri kullanılmıştır (Şekil 2.29).



Şekil 2.29. Numunelerin ölçümünde kullanılan termal çiftler.

Bu çalışmada lehim alaşımlarının ısı iletkenliğini ölçmek için 673 K (400 °C)'e kadar ulaşabilen ve istenilen sıcaklığa ayarlanabilen *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı* 'nda bulunan lineer ısı akış sistemi kullanılmıştır.

Üç adet termal çift 7 mm aralıklarla yerleştirilmiş ve ölçüm sırasında kaymamaları için birbirlerine sabitlenmiştir. Daha sonra termal çiftlerin uçları Şekil 2.30 da yer alan veri kaydediciye (data logger) takılmış ve bilgisayara bağlanmıştır. Numune tutucularına yerleştirilen numune ısıtıcı ve soğutucu sistemler arasına yerleştirilmiş ve kenar vidalardan sıkıştırılmıştır. Isıtıcı sistem ile soğutucu sistem arasında 10 mm'lik bir mesafe olacak şekilde metal bir tabla üzerine sabitlenmiştir. Doğrusal bir sıcaklık gradyenti oluşturmak için, ısıtıcı sistem üstte, soğutucu sistem altta olacak şekilde dikey bir pozisyonda Şekil 2.31 de gösterildiği gibi konumlandırılmıştır.

Numune sisteme yerleştirildikten sonra ısı iletkenlik ölçümü istenilen sıcaklıklarda ölçüm almaya hazır hale gelmiştir. Isı iletkenlik katsayısının ölçülebilmesi için sıcaklık kontrolünün yüksek hassasiyete sahip ve çok iyi okuma yapabilmesi gerekir. Bu sebeple ± 0.01 K hassasiyete sahip *Eurotherm 2704* marka sıcaklık kontrolcüsü ile ısıtıcı sistemin sıcaklığı kontrol edilmiştir. Deneye başlamadan önce soğutucu 271 K (-2°C) sıcaklıkta sabitlenmiştir. Varyak üzerine yer alan kademeli gösterge düşük seviyeden yüksek seviyeye kadar artırılarak ısıtıcı sisteme güç sağlanmıştır. Böylece ısıtıcı sistem yavaş yavaş ısıtılmıştır. Isıtıcı sistem kontrolcüsünde set sıcaklığı 313 K olarak ayarlanmıştır. Her bir sıcaklıkta en az 20 dk. beklenerek numune üzerindeki sıcaklığın kararlı hal alması

sağlanır. Kararlı hale gelince *Pico TC-08* veri kaydedicisi yardımıyla termal çiftlerin sıcaklıkları bilgisayara aktarılmış ve ısıtma süresince kaydedilmiştir. İki termal çiftten okunan sıcaklık değerlerinin ΔT değerleri veri kaydediciyle bilgisayara aktarılan dosyadan bulunarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.30. Sıcaklık kaydedici.

Picotest 3511-A model multimetreler aracılığıyla ısıtıcı sistemdeki potansiyel düşüşü ve ısıtıcıdan geçen akım ölçülmüştür. Ölçüm alınan sıcaklıktaki akım ve potansiyel *Picotest M35XX AP* programıyla kaydedilmiş ve güç girişi hesaplanmıştır. Isıtma boyunca istenilen sıcaklıklarda ölçümler tamamlandıktan sonra, sistem soğumaya bırakılmış ve numune yuvadan çıkarılmıştır.

Benzer şekilde diğer numuneler için de 20 K'lık artışlarla malzemelerin erime sıcaklıklarının altına kadar ısıl iletkenlikleri ölçülmüştür.

2.11. Elektriksel Özdirenç/İletkenlik Değerlerinin Ölçümü için Bir Deneyin Yapılışı

Alaşımın elektriksel özdirenç/iletkenlik değerleri *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fizik Laboratuvarı* 'nda bulunan dört nokta prob yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Elektriksel özdirenç/iletkenlik ölçüm düzeneği.

Sistem, eşit aralıklarla numune üzerine temas ettirilen dört adet platin tellerin (prob) ikisinden akım diğer ikisinden ise gerilimin okunduğu bir cihaza bağlıdır. Problar, *Protherm* marka kül fırını içerisine yerleştirilmiş özel olarak tasarlanmış numune tutucusu olarak adlandırılan seramik bir malzemeye monte edilmiştir (Şekil 2.33). Numune tutucusuna yerleştirilen numunelerin platin tellere teması hassasiyet içerisinde gerçekleştirilmelidir. Fırın içerisine yerleştirilmiş termal çift (K tipi) vasıtasıyla numunelerin oda sıcaklığında ya da sıcaklığa bağlı olarak elektriksel özdirenç/iletkenlik değerlerini tayin etmek mümkündür. Cihaz üzerinden akım ve gerilim aralıkları belirlenerek problar vasıtasıyla akım, gerilim ve fırın içerisinden cihaza bağlanmış olan termal çift aracılığıyla sıcaklık değerleri, sistemi destekleyen bir program yardımıyla bilgisayara kaydedilir.



Şekil 2.33. Elektriksel öz direnç/iletkenlik numune tutucusu.

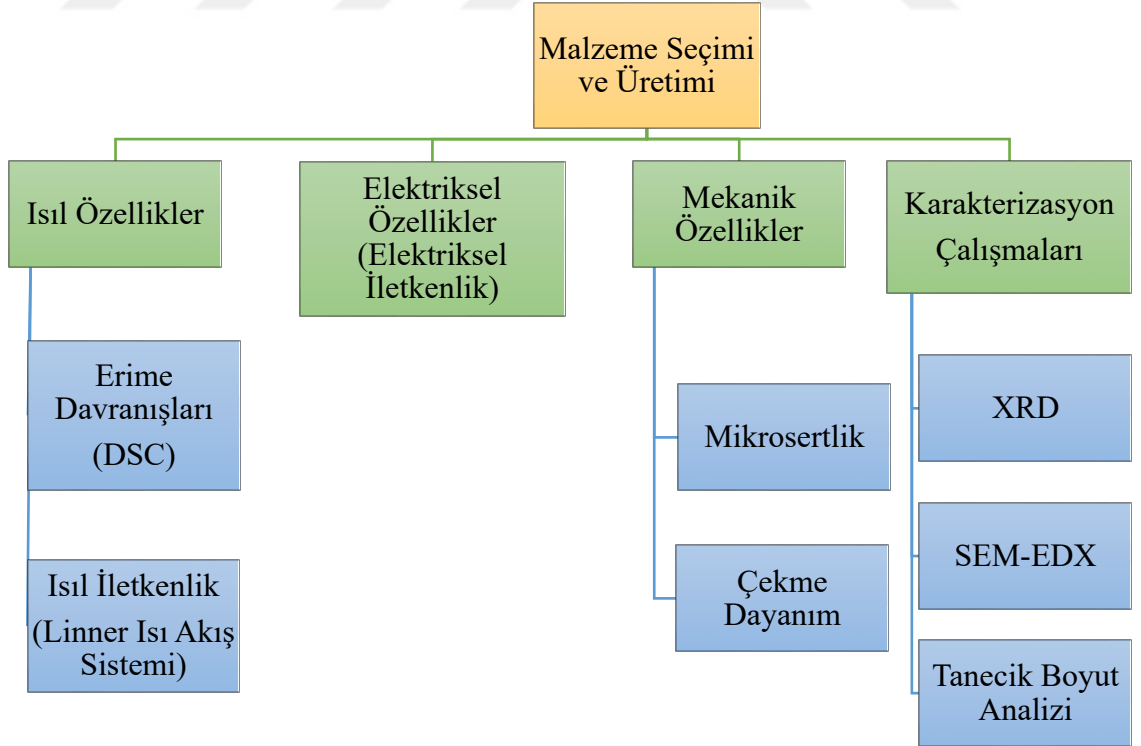
Alaşımlardan t (kalınlık) ve d (çap) değerleri sırasıyla 3 mm ve 8 mm olacak şekilde kesitler alınmıştır. Problar arası mesafe her zaman 1 mm olarak sabit tutulmuştur. Tüm bu bilgiler ışığında G düzeltme faktörü hesaplanmıştır. Ölçümü alınacak olan numune, fırın içerisindeki numune tutucusuna yerleştirilmiştir. Platin teller (problar) numunenin düz ve pürüzsüz yüzeyine temas ettirilmiş ve tam temasın sağlandığı dört nokta iletkenlik ölçüm cihazdan kontrol edilmiştir. Potansiyel fark ve akım değerlerinin okunduğu cihaz veri okuyacak konuma getirilmiştir. Bilgisayarda saniye başına akım, potansiyel ve sıcaklık kaydı alan dört nokta iletkenlik kayıt programı başlatılmıştır. Bir süre sonra fırın ısıtması açılarak sıcaklıkla değişen akım ve potansiyel verileri kaydedilmiştir. Numunenin erime sıcaklığının yaklaşık 10 K altına kadar ölçüm alınmış, sonra fırın ısıtması ve program durdurulmuştur. Bilgisayar ortamında kaydedilen akım, potansiyel fark ve hesaplanan G değeri eşitlik 2.1 de yerine yazılmış ve elektriksel öz direnç belirlenmiştir. Öz direncin tersi alınarak her sıcaklıktaki elektriksel iletkenlik değerleri tayin edilmiştir.

Elektriksel iletkenlik ölçümleri, her bir numune için erime sıcaklığının yaklaşık 10 K altına kadar saniyede bir kez yapılmıştır. Deneysel sonuçlar grafiklerle birlikte 3. Bölüm’de detaylı olarak verilmiştir.

3. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, kurşunsuz lehim alaşımlarına aday olarak seçilmiş ve üretilmiş; Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik, erime davranışları, mikroyapı, örgü parametreleri, sertlik ve çekme özellikleri incelenerek sonuçlar grafik ve tablolarla verilmiştir. Şekil 3.1. de deneysel çalışma sistematığı özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışma sistematığı.

3.1. Alaşımların Erime Davranışlarının ve Termal Özelliklerinin Belirlenmesi

Alternatif kurşunsuz lehim alaşımı olarak üretilen alaşımların erime davranışları, entalpi ve ısı kapasitesi gibi termal özellikleri belirlemek için DSC (diferansiyel taramalı kalorimetri) analizi yapılmıştır. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 de alaşımların 10 K/dak. ısıtma hızında 0-773 K aralığındaki ısı akışının sıcaklıkla değişimleri verilmiştir. Bu eğrilerden her bir alaşımın solidüs sıcaklığı (T_S), likidüs sıcaklığı (T_L), pik sıcaklığı (T_M), entalpi (ΔH), ısı kapasitesi (C_P), geçiş aralığı sıcaklığı (ΔT) ve benzeş sıcaklık (homolog sıcaklık) değerleri hesaplanarak Tablo 3.1 de verilmiştir.

Sabit basınç altında ısı kapasitesi,

$$C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir. Sabit basınçta ısı kapasitesi ile entalpideki değişim şu şekilde verilir:

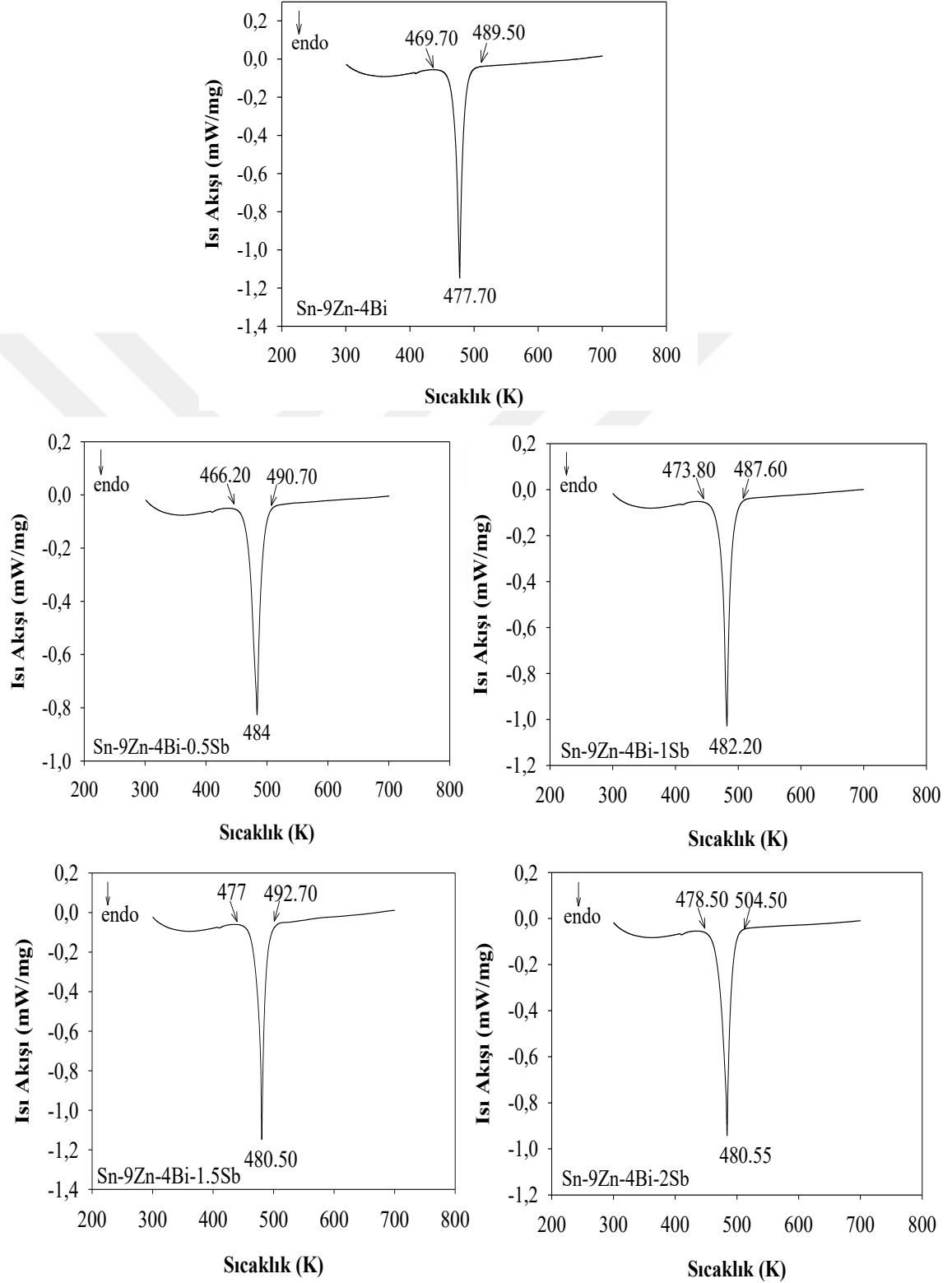
$$\Delta H \approx \Delta C_P T_M \quad (3.2)$$

Burada ΔC_P ısıdaki değişimdir ve T_M erime sıcaklığıdır. Füzyon entalpisi (ΔH), sayısal entegrasyonla pik altındaki alan olarak hesaplanır ve ardından füzyon entalpisinin pik sıcaklığına bölünmesiyle ısı kapasitesi (C_P) belirlenir.

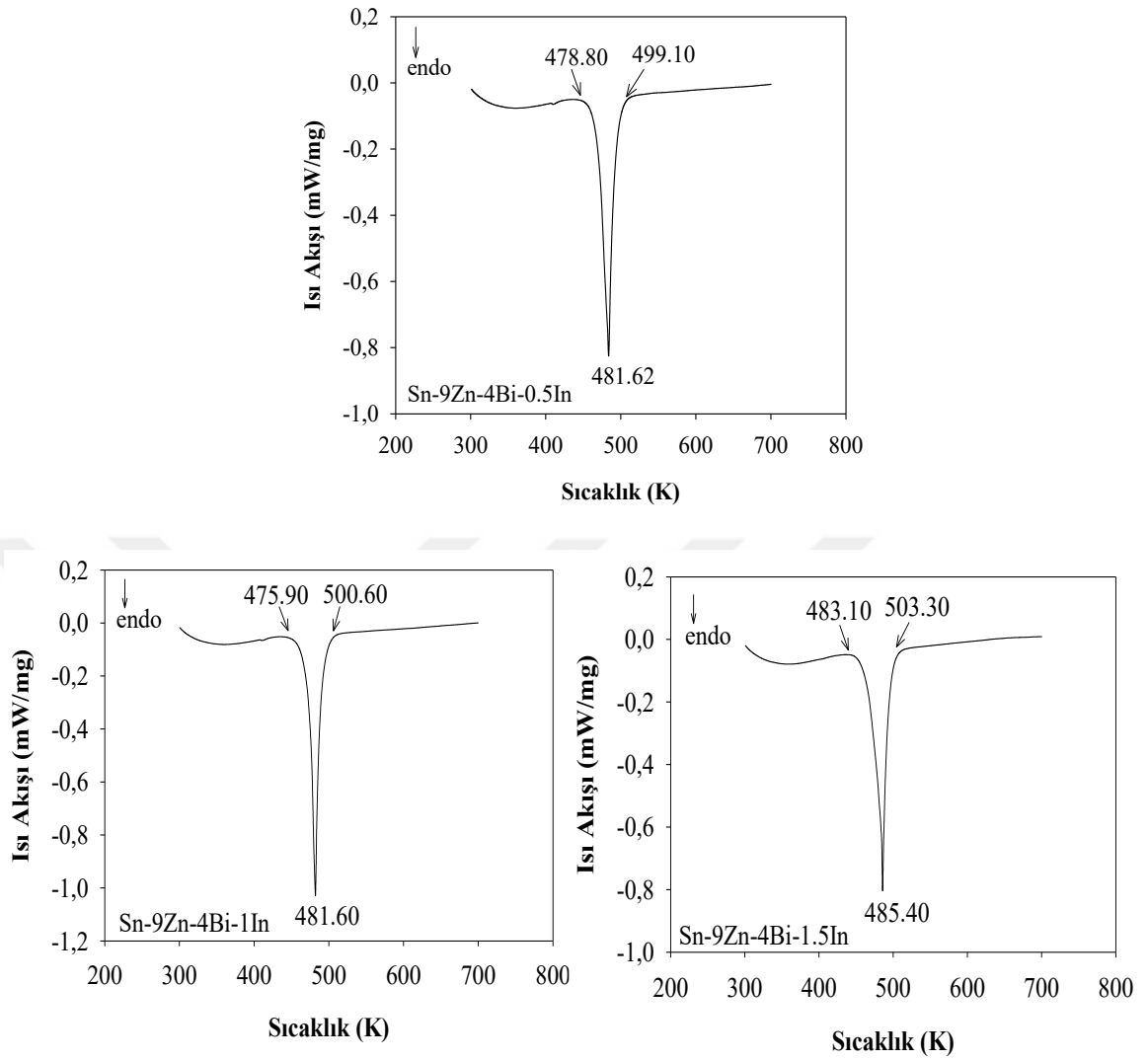
Alaşımların DSC eğrilerinde keskin bir endotermik tepe noktası gözlenmiştir. Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In, Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının maksimum erime noktaları sırasıyla 477.70, 484, 482.20, 480.50, 480.55, 481.62, 481.60, 479.21 K olarak tespit edilmiştir. Tablo 3.1 den görüldüğü gibi Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ve In katkısı erime noktasını artırmıştır. Alaşımlar arasında 1.5 ağırlık % In ilavesi erime noktası en düşük olan lehim alaşımı olmuştur.

Tablo 3.1'de alaşımların geçiş aralığı sıcaklıkları incelendiğinde Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımı 13.80 K ile en düşük geçiş aralığı sıcaklığına sahip olan lehim alaşımıdır. DSC eğrilerinden elde edilen bir diğer husus da entalpi ve özgül ısıdır. 74.24 J/g entalpi değeri ile en iyi enerji tasarrufu, In oranı ağırlıkça %1 olan alaşımdır. Seçilmiş lehim alaşımlarının DSC eğrilerinin pik noktalarından özgül ısı deperleri hesaplanmış ve bu değerlere göre enerji depolama kapasitesi en düşük olan malzeme 0.3559 J/gK değeri ile

ağırlıkça %1 In içeren alaşımdır. Diğer tüm alaşımlar incelendiğinde entalpi ve özgül ısı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 3.2. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) alaşımlarının ısı akışının sıcaklıkla değişimi.



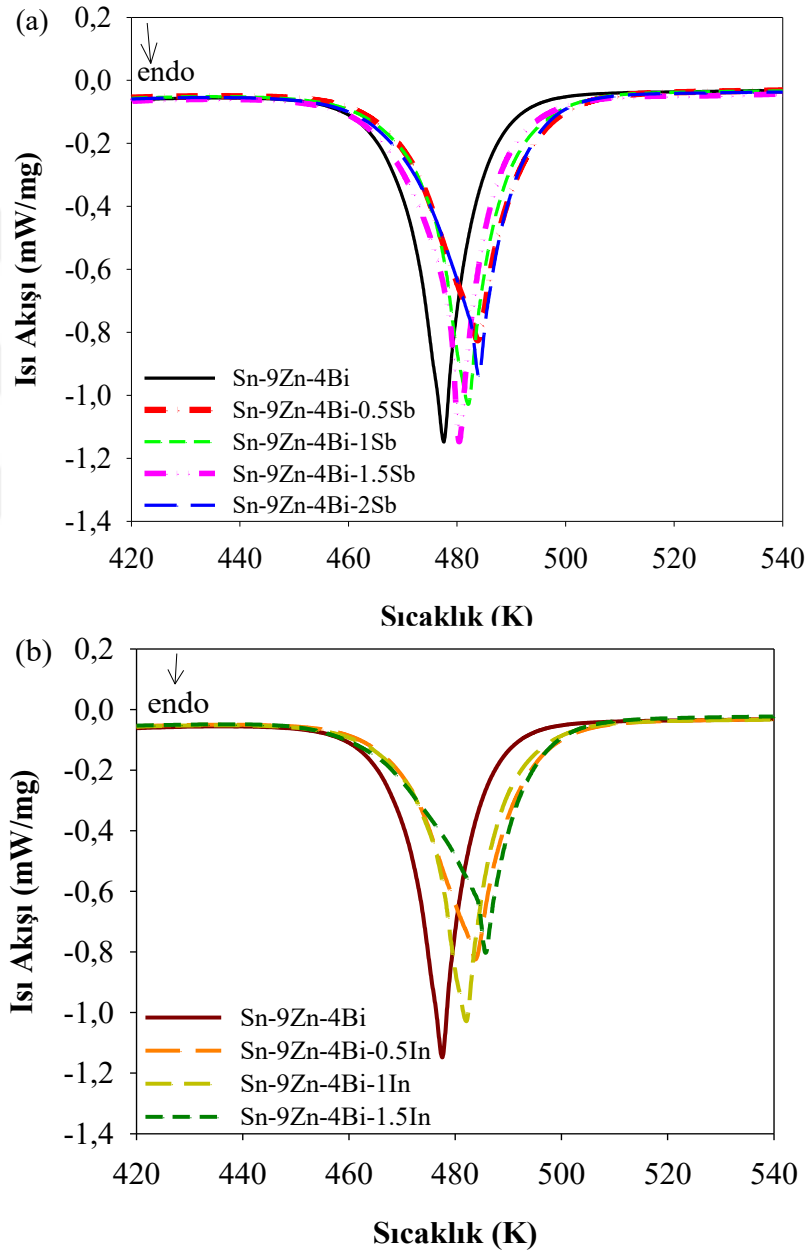
Şekil 3.3. Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x = 0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının ısı akışının sıcaklıkla değişimi.

Şekil 3.4 (a) ve (b) de sırasıyla Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb ($x = 0, 0.5, 1, 1.5, 2$) ve Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x = 0, 0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının birbiri içerisinde mukayese edilebilmesi için çakışık durumda çizilen ısı akış eğrileri yer almaktadır. Şekil 3.4 (a) ve (b) de yeni geliştirilen kurşunsuz lehim alaşımlarının sabit bir erime noktasına sahip bir ötektik bileşimini gösteren yalnızca bir tepe noktasının gözlemlenebileceği açıktır.

Tablo 3.1. Seçilen lehim alaşımlarının erime davranışları ve termal özellikleri.

Alaşımlar	Solidüs Sıcaklığı (K)	Likidüs Sıcaklığı (K)	Pik Sıcaklığı (K)	Geçiş Aralığı (K)	Entalpi (J/g)	Isı Kapasitesi (J/gK)	Benzeş Sıcaklık
Sn-9Zn-4Bi	469.70	489.50	477.70	19.80	76.92	0.3758	0.628
Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb	466.20	490.70	484	24.50	76.94	0.3646	0.633
Sn-9Zn-4Bi-1Sb	473.80	487.60	482.20	13.80	78.35	0.3745	0.623
Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb	477	492.70	480.50	15.70	77.03	0.3712	0.619
Sn-9Zn-4Bi-2Sb	478.50	504.50	480.55	26	78.83	0.3798	0.617
Sn-9Zn-4Bi-0.5In	478.80	497.10	481.62	18.30	74.27	0.3560	0.616
Sn-9Zn-4Bi-1In	475.90	495.15	481.60	19.25	74.24	0.3559	0.620
Sn-9Zn-4Bi-1.5In	483.10	497.18	479.21	14.08	75.34	0.3653	0.611

Tablo 3.1’de lehim alaşımlarının benzeş sıcaklıkları da hesaplanmıştır. Benzeş sıcaklık (T_B), alaşımın Kelvin cinsinden istenen çalışma sıcaklığının yine Kelvin cinsinden erime noktasına bölünmesiyle elde edilir. Bir alaşım içindeki atomların aktifleşme durumunun bir ölçüsüdür. Çoğu lehim alaşımı için oda sıcaklığında benzeş sıcaklık $0.5 < T_B < 1$ olmalıdır [2]. Üretilen alaşımların benzeş sıcaklıkları 0.5’ten büyük olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4. (a) Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) (b) Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x=0, 0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının çakışık DSC eğrileri.

3.2. Alaşımların Isıl İletkenliğinin Ölçümü

Bu tez çalışmasında Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi lineer ısı akış metoduyla ölçülmüştür. Çubuk şeklindeki numune, düşey konumda bulunan sistemde alt ucundan soğutulurken üst ucundan da ısıtılmıştır. Böylece numune üzerinde sabit bir sıcaklık gradyenti oluşur. Numunenin ısı iletkenliği 20 K'lık artışlarla erime sıcaklığını aşmayacak şekilde ölçülmek üzere ısıtılmıştır. Belirlenen sıcaklıkta sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Kararlı duruma gelen numunenin farklı noktadaki sıcaklıkları termal çiftler yardımıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Aynı zamanda akım ve potansiyel düşüşleri de multimetreler yardımıyla okunarak bilgisayara aktarılmıştır.

Lineer ısı akış ısı iletkenlik ölçüm sisteminde, radyal ısı kazancı veya kaybı olmadığı düşünülerek, numune üzerinden geçen sıcaklık kararlı olduğunda ısı iletkenlik Fourier-Biot ısı iletim Denklemi 3.3,

$$K = -\frac{Q \Delta X}{A \Delta T} \quad (3.3)$$

ile ifade edilir. Burada K numunenin ısı iletkenliği, Q güç girişi, A numunenin kesit alanı, $\Delta X = X_2 - X_1$ termal çiftler arasındaki mesafe, $\Delta T = T_2 - T_1$, X_2 ve X_1 noktaları arasındaki sıcaklıkların ölçüldüğü noktalar arasındaki uzaklıktır [30].

Çubuk şeklindeki numune üzerinden akan ısı akış hızının (giriş gücü) ölçülmesi en zor aşamalardan birisidir. Fakat bu sorunu aşmak için, her sıcaklıkta kararlı hal için numune üzerinden akan Q ısı akış hızının, Denklem 3.4'deki gibi olduğu varsayılmıştır.

$$Q = Q_{NV} - Q_{NY} \quad (3.4)$$

Burada Q_{NY} , kararlı haldeki deneysel sistemde numune yokken ve Q_{NV} ise yine kararlı haldeki sistemde numune varken verilen giriş gücüdür. Isı akış hızı belirlenirken kararlı hal durumunda ısıtıcıdan akan akım ve voltaj ölçülerek sırasıyla aşağıda yer alan Denklem 3.5 ve 3.6 bağıntılarından bulunmuştur.

$$Q_{NY} = V_{NY} \cdot I_{NY} \quad (3.5)$$

$$Q_{NV} = V_{NV} \cdot I_{NV} \quad (3.6)$$

Isıl iletkenliği tayin etmek için; numunenin kesit alanını (A), numune içerisinde yerleştirilen termal çiftlerden okunan en az iki noktanın sıcaklığını (ΔT), termal çiftler arası uzaklığı (ΔX) ve giriş gücünü (Q) tespit etmek gereklidir.

Kararlı hal sıcaklığında termal çiftler vasıtasıyla okunan sıcaklık değerleri *Pico TC-08* veri kaydedici yardımıyla bilgisayara transfer edilerek ısıtmanın gerçekleştiği süre boyunca kaydedilmiştir. ΔT , veri kaydedici kayıtlarından okunan iki termal çift arasındaki sıcaklık farkıdır. Eş zamanlı olarak multimetrelerden ısıtıcı sistem üzerindeki potansiyel düşüşü ve akım kaydedilen kayıtlardan alınarak güç girişi hesaplanmıştır.

Isıl iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı değişimi Denklem 3.1'den, Q , ΔX , A ve ΔT değerleri kullanılarak tayin edilmiştir. Alaşımların her biri için kaydedilen veriler ve yapılan hesaplamalarla elde edilen ısı iletkenlik sonuçları Tablo 3.2. ve Tablo 3.3 de verilmiştir.

Tablo 3.2. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) alaşımlarının ısı iletkenlik ölçümünün deneysel verileri.

Sn-9ağ.%Zn-4ağ.%Bi				
T (K)	T (°C)	Q (W)	ΔT (K)	K (W/Km)
313	40	1.05	5.55	55.70
333	60	1.22	6.96	51.38
353	80	1.51	9.11	48.56
373	100	1.73	11.42	44.51
393	120	1.89	13.17	42.07
413	140	2.02	15.52	38.14
433	160	2.08	17.32	35.21

Sn-9ağ.%Zn-4ağ.%Bi-0.5ağ.%Sb				
T (K)	T (°C)	Q (W)	ΔT (K)	K (W/Km)
313	40	0.62	3.08	58.76
333	60	0.68	3.57	55.85
353	80	0.81	4.45	53.23
373	100	0.88	5.02	51.35
393	120	0.91	5.54	48.14
413	140	0.98	6.35	45.46
433	160	1.10	7.62	42.18

Sn-9ağ.%Zn-4ağ.%Bi-1ağ.%Sb				
T (K)	T (°C)	Q (W)	ΔT (K)	K (W/Km)
313	40	0.60	3.06	57.82
333	60	0.80	4.29	54.66
353	80	0.96	5.51	50.80
373	100	1.12	7.11	46.22
393	120	1.25	8.35	43.80
413	140	1.29	9.36	40.51
433	160	1.34	10.78	36.44

Sn-9ağ.%Zn-4ağ.%Bi-1.5ağ.%Sb				
T (K)	T (°C)	Q (W)	ΔT (K)	K (W/Km)
313	40	0.60	1.54	57.47
333	60	0.87	2.39	53.05
353	80	1.00	2.93	50.07
363	100	1.17	3.75	45.95
393	120	1.24	4.19	43.29
413	140	1.28	4.66	40.24
433	160	1.37	5.54	36.28

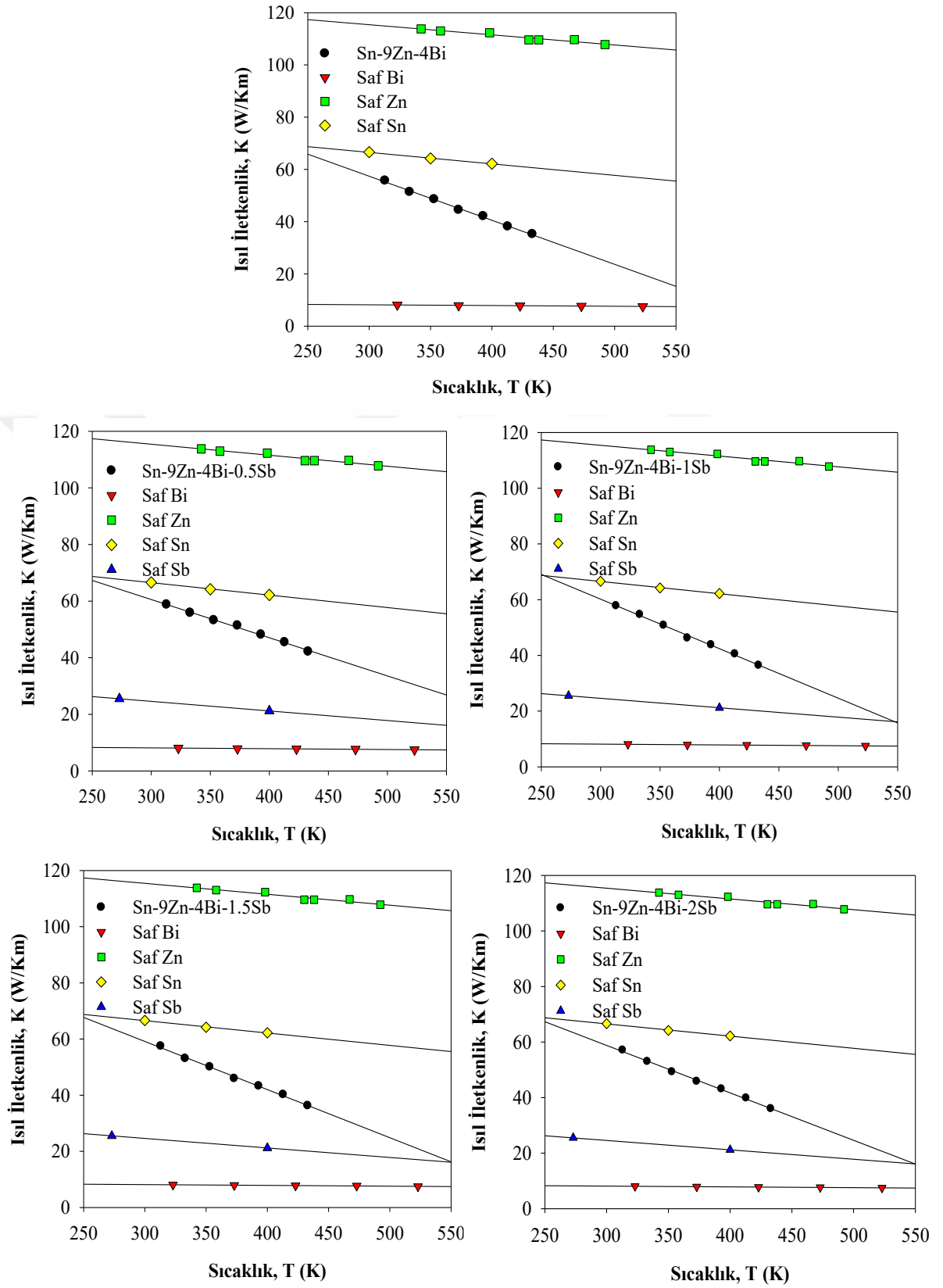
Sn-9ağ.%Zn-4ağ.%Bi-2ağ.%Sb				
T (K)	T (°C)	Q (W)	ΔT (K)	K (W/Km)
313	40	0.63	3.22	57.10
333	60	0.81	4.47	52.98
353	80	0.91	5.43	49.27
373	100	0.98	6.26	46.59
393	120	1.06	7.20	43.13
413	140	1.17	8.61	39.84
433	160	1.24	10.07	36.03

Tablo 3.3. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0.5, 1, 1.5) alaşımlarının ısı iletkenlik ölçümünün deneysel verileri.

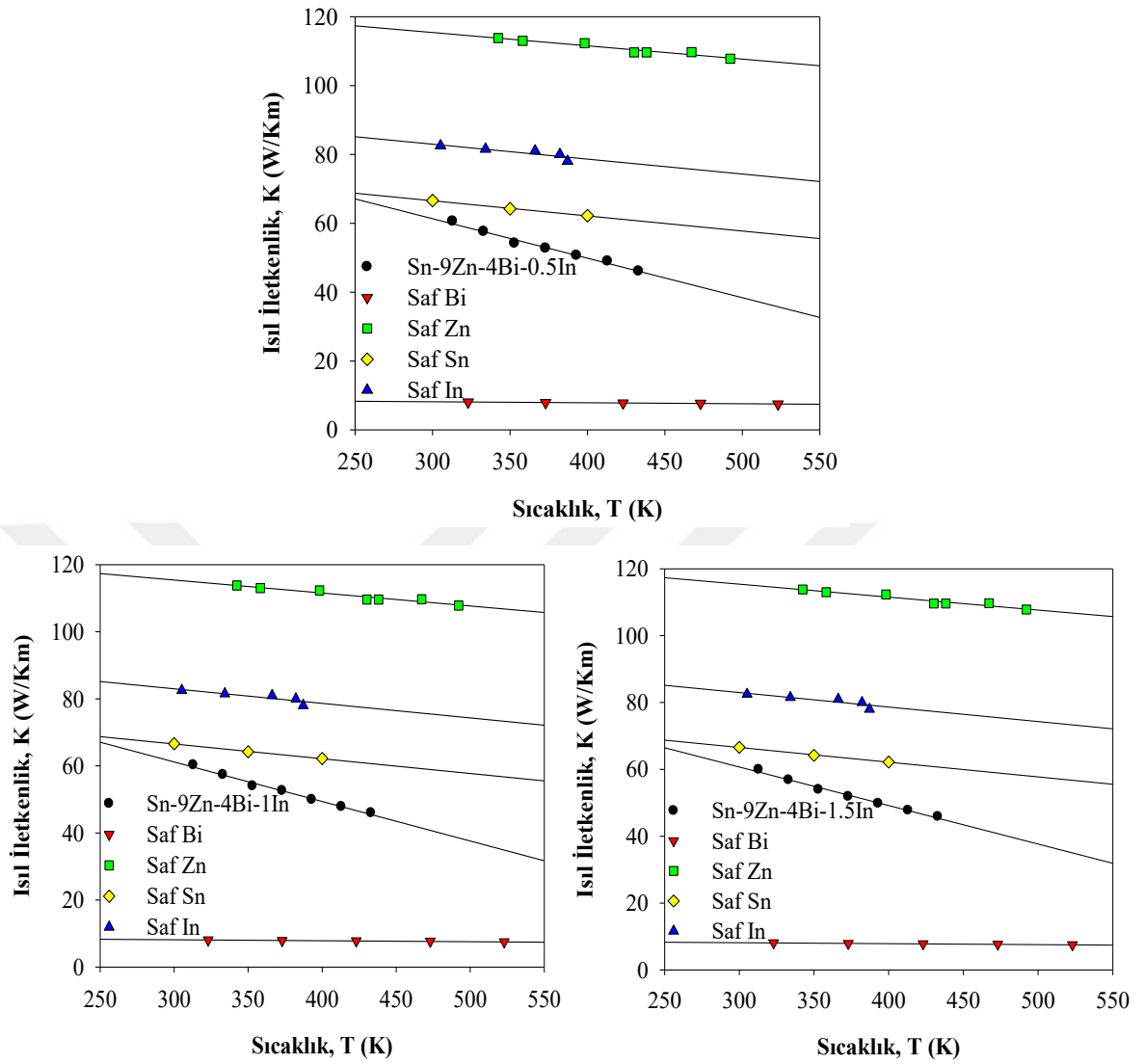
Sn-9ağ.%Zn-4ağ.%Bi-0.5ağ.%In				
T (K)	T (°C)	Q (W)	ΔT (K)	K (W/Km)
313	40	0.67	3.27	60.58
333	60	0.94	4.76	57.58
353	80	1.08	5.85	54.16
373	100	1.14	6.31	52.71
393	120	1.33	7.72	50.62
413	140	1.40	8.39	48.99
433	160	1.51	9.60	46.07

Sn-9ağ.%Zn-4ağ.%Bi-1ağ.%In					Sn-9ağ.%Zn-4ağ.%Bi-1.5ağ.%In				
T (K)	T (°C)	Q (W)	ΔT (K)	K (W/Km)	T (K)	T (°C)	Q (W)	ΔT (K)	K (W/Km)
313	40	0.70	3.39	60.27	313	40	0.73	1.77	59.95
333	60	0.98	4.99	57.36	333	60	0.99	2.55	56.82
353	80	1.14	6.16	54.01	353	80	1.15	3.13	53.95
373	100	1.23	6.87	52.59	373	100	1.25	3.52	51.85
393	120	1.33	7.79	49.94	393	120	1.33	3.91	49.79
413	140	1.49	9.13	47.82	413	140	1.47	4.52	47.74
433	160	1.63	10.36	45.98	433	160	1.50	4.81	45.88

Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’deki verilerden faydalanılarak Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 da her bir alaşımın ve saf metallerle birlikte ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri çizilmiştir.



Şekil 3.5. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) alaşımlarının saf Sn, saf Zn, saf Bi ve saf Sb [28] ile ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.



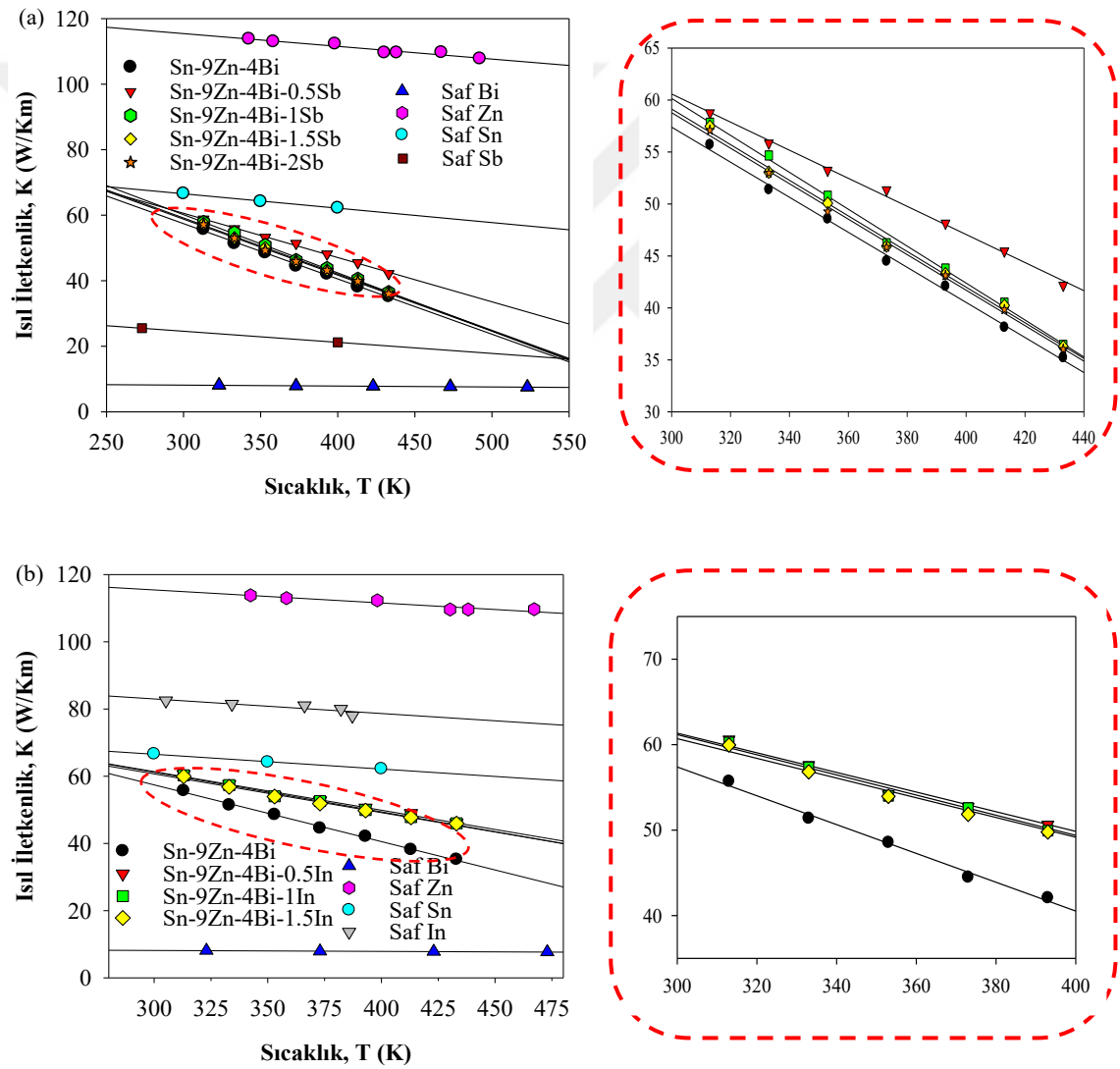
Şekil 3.6. Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x=0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının saf Sn, saf Zn, saf Bi ve saf In [28] ile ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 da alaşımların ısı iletkenlik eğrileri saf metaller arasında yer almış ve saf Sn eğrisine uzanmışlardır. Sistemlerdeki Sb miktarı arttıkça ölçülen ısı iletkenlik değerleri saf Sb'nin ısı iletkenlik çizgisine yaklaşmıştır. Sn-Zn-Bi alaşım sistemine In ilavesi ile alaşımlar saf Sn ve Bi eğrileri arasında kalmıştır. Sn-9Zn-4Bi alaşımına In eklenmesi ısı iletkenliği artırmıştır. In miktarı arttıkça, ısı iletkenlik değerleri saf In değerine yaklaştığı görülmüştür.

Tablo 3.4 de Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn -9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımların erime sıcaklığındaki ısı iletkenlikleri sırasıyla 32.89, 35.73, 27.60, 27.30, 27, 40.30, 39.96 ve

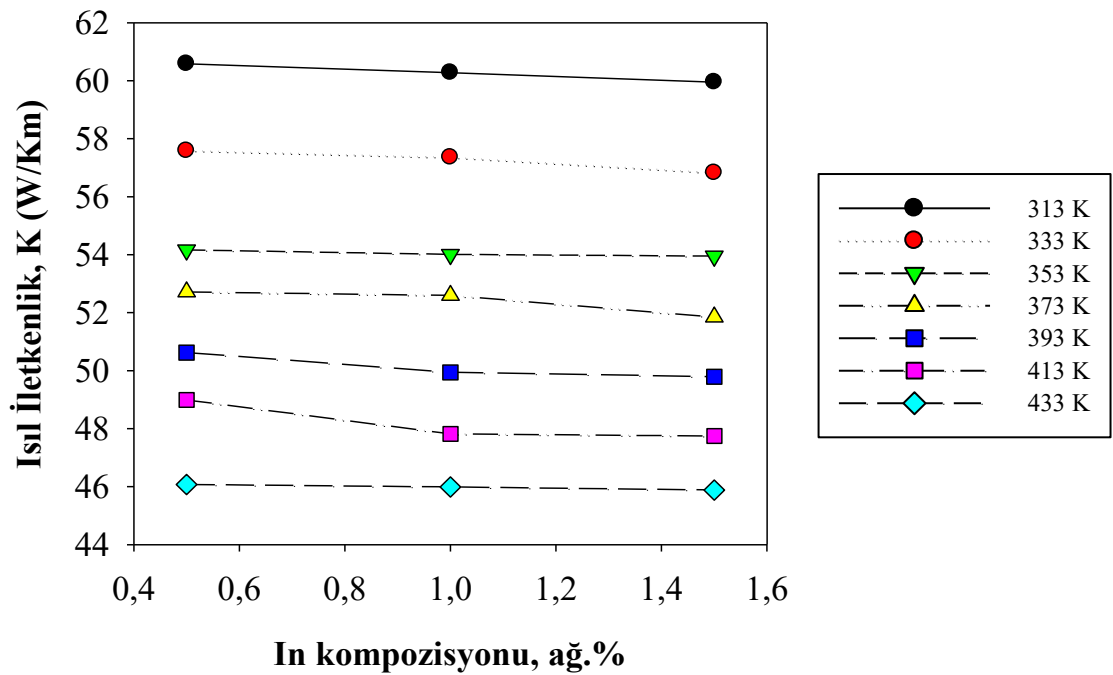
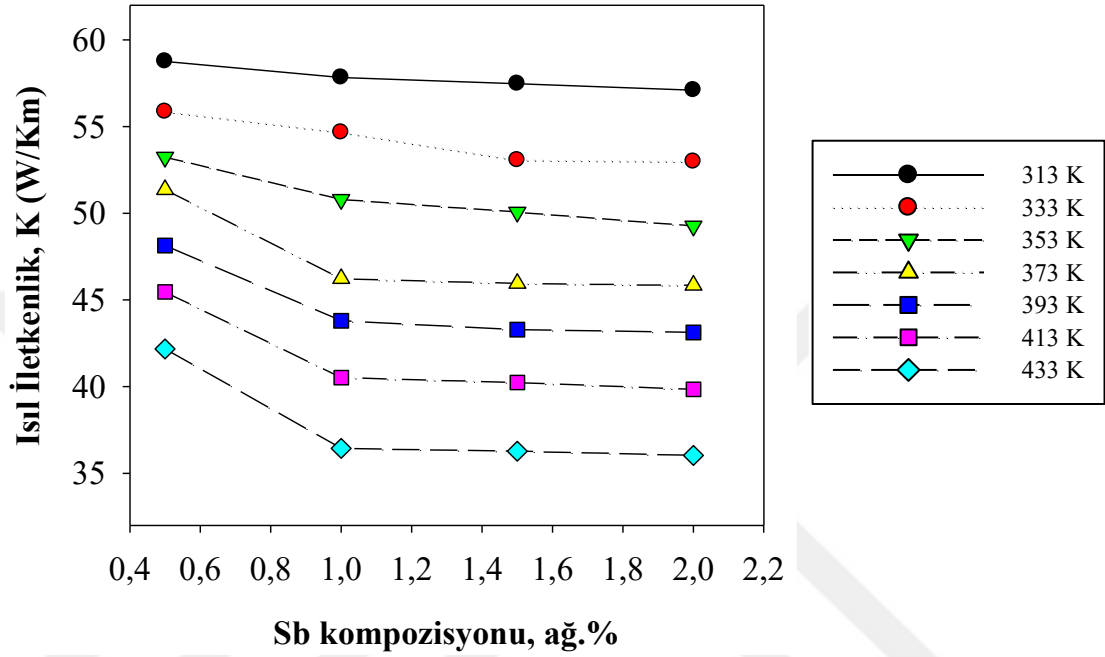
39.59 W/Km olarak tespit edilmiştir. Aynı alaşımların ısı iletkenlik sıcaklık katsayıları 2.39, 2.20, 2.96, 2.99, 3.10, 1.87, 1.91 ve 1.94 ($\times 10^{-3}$) K⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.7 (a) ve (b) de Sn-9Zn-4Bi alaşımına farklı oranlarda Sb ve In katkısının bir arada saf Sn, saf Zn, saf Bi, saf Sb ve saf In metallerinin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla olan değişimi verilmiştir. Sb ve In ilave edilmiş alaşımlar incelendiğinde, In ilavesinin ısı iletkenliği arttırdığı görülmüştür.



Şekil 3.7. Sn-9Zn-4Bi alaşımına (a) Sb (b) In katkısının saf Sn, saf Zn, saf Bi, saf Sb ve saf In [28] metallerinin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla olan değişimi.

Şekil 3.8 (a) ve (b) de ise ısı iletkenliğin Sb ve In içeriğine ve sıcaklığa olan bağlılığı yer almaktadır. 313, 333, 353, 373, 393, 413 ve 433 K sıcaklıklarındaki ısı iletkenlik değerleri Sb ve In içeriğinin artışı ile azalmıştır.



Şekil 3.8. Alaşımların ısı iletkenliklerinin (a) Sb içeriğine (b) In içeriğine ve sıcaklığa bağlı değişimi.

3.2.1. Isıl İletkenlik Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması

Katı bir fazın ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağılılığı doğrusaldır. Isıl iletkenliğin sıcaklığa bağılı değişimi Denklem 3.7 ile şöyle ifade edilir,

$$K_K = K_{K0} [1 + \alpha_T (T - T_0)] \quad (3.7)$$

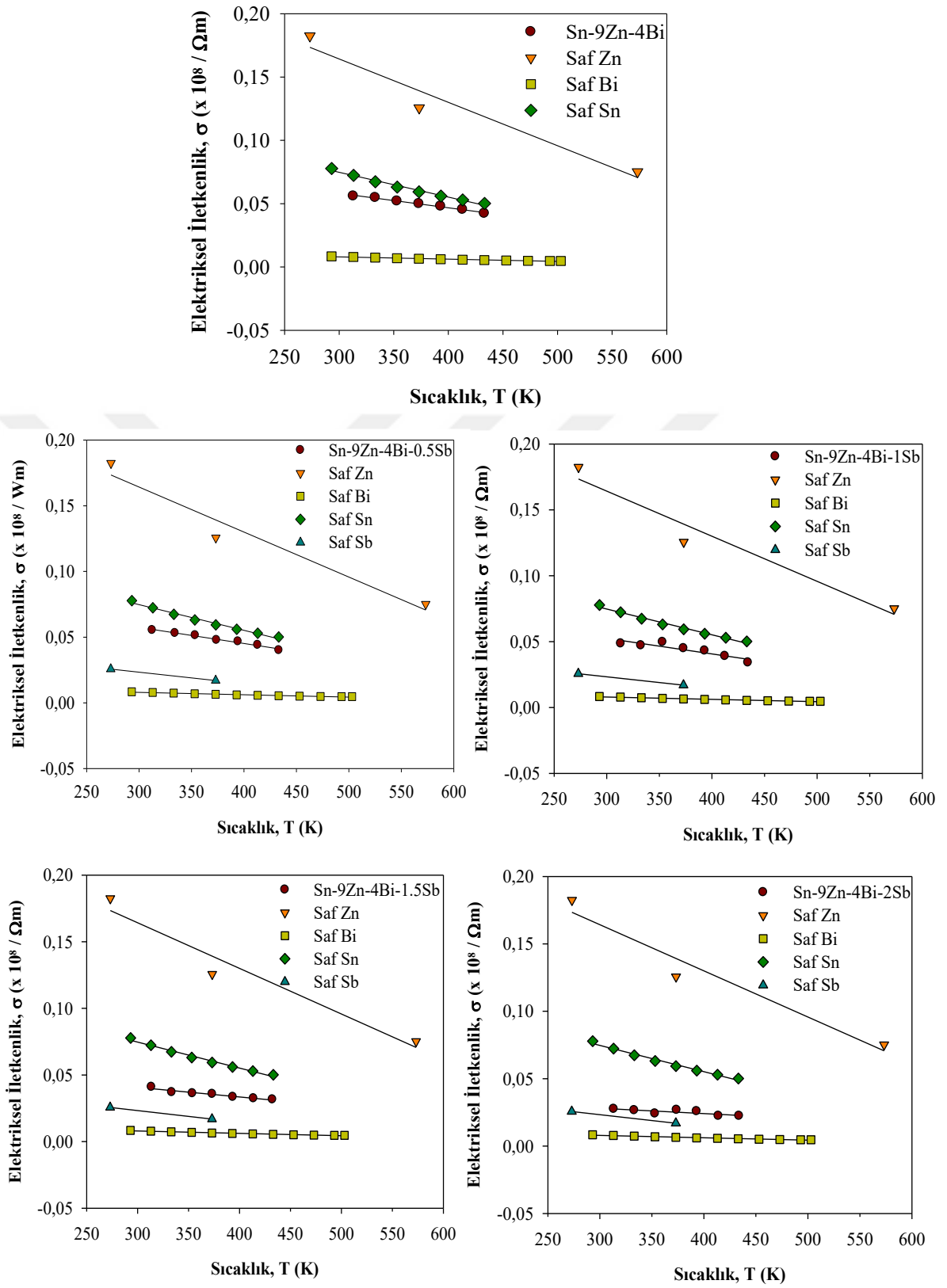
Burada, ısı iletkenlik katsayısı T sıcaklığında K_K 'dır. $T_0=300$ K sıcaklığında ısı iletkenlik katsayısı K_{K0} ile gösterilir. α_T , ısı sıcaklık katsayısıdır. Denklem (3.7)'den ısı sıcaklık katsayısı Denklem 3.8 ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\alpha_T = \frac{K_K - K_{K0}}{K_{K0} (T - T_0)} = \frac{1}{K_{K0}} \frac{\Delta K}{\Delta T} \quad (3.8)$$

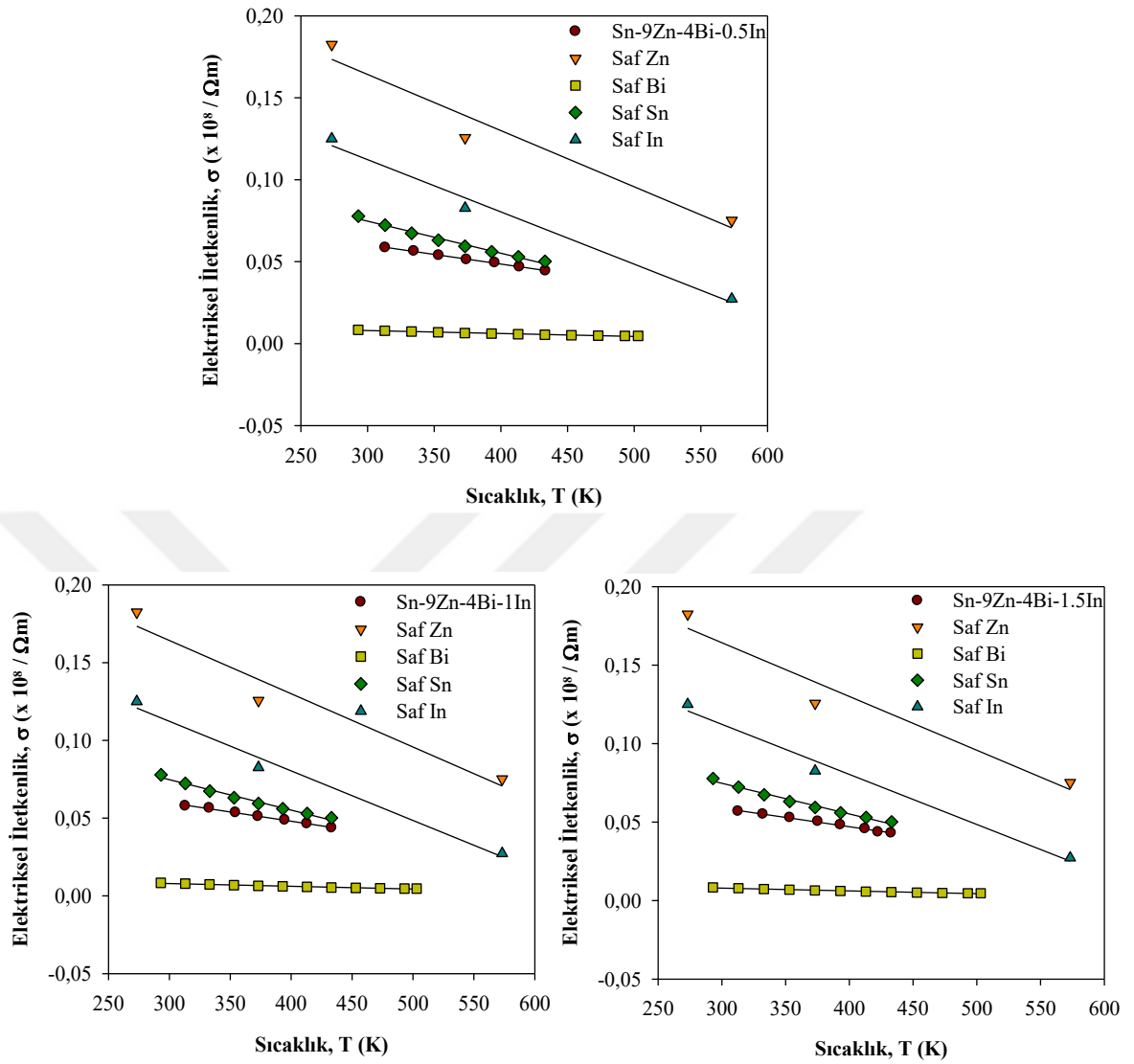
Denklem (3.8), ısı iletkenliğin sıcaklığa bağılı grafiğinin eğiminden ısı sıcaklık katsayısının elde edildiğini gösterir [30]. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 da yer alan alaşımların ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişiminden ısı iletkenlik sıcaklık katsayıları hesaplanmıştır. Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımları için ısı iletkenlik sıcaklık katsayıları sırasıyla 2.39, 2.20, 2.96, 2.99, 3.10, 1.87, 1.91 ve 1.94 ($\times 10^{-3}$) K⁻¹ olarak tespit edilmiş ve Tablo 3.4'de verilmiştir.

3.3. Alaşımların Elektriksel İletkenliğinin Ölçümü

Bu tez çalışmasında Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi dört nokta prob metodu ile ölçülmüştür. Her bir numunenin G düzeltme faktörü hesaplanmıştır. Deney sırasında kaydedilen akım, potansiyel ve G değerleri Denklem 2.1 de yerine yazılmıştır. Böylece her sıcaklık için elektriksel öz direnç/iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Elde edilen verilerle her bir alaşımların elektriksel iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi saf metallerle birlikte Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 da yer almaktadır.



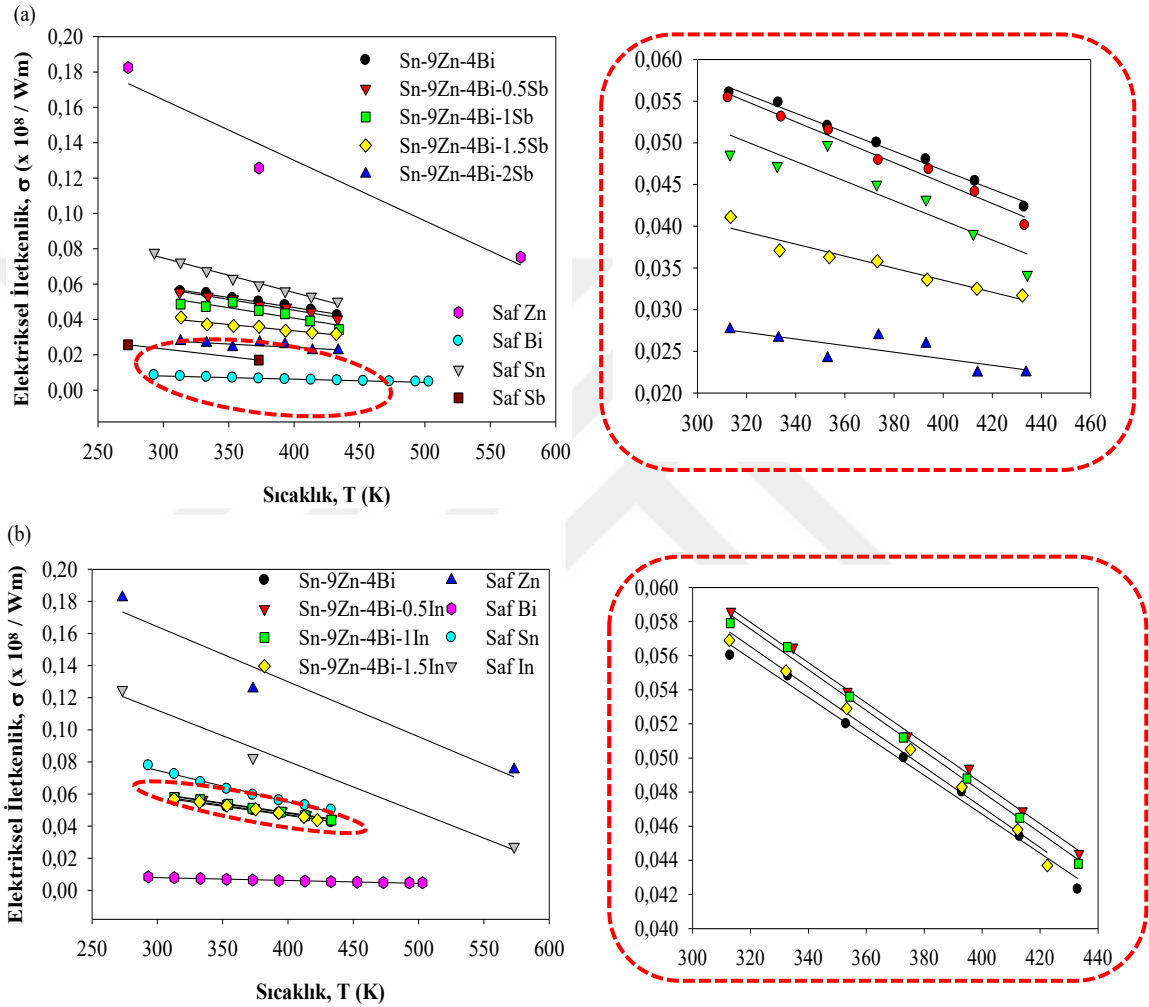
Şekil 3.9. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2$) alaşımlarının saf Sn, saf Zn, saf Bi ve saf Sb [28] ile elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 3.10. Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x=0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının saf Sn, saf Zn, saf Bi ve saf In [28] ile elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.

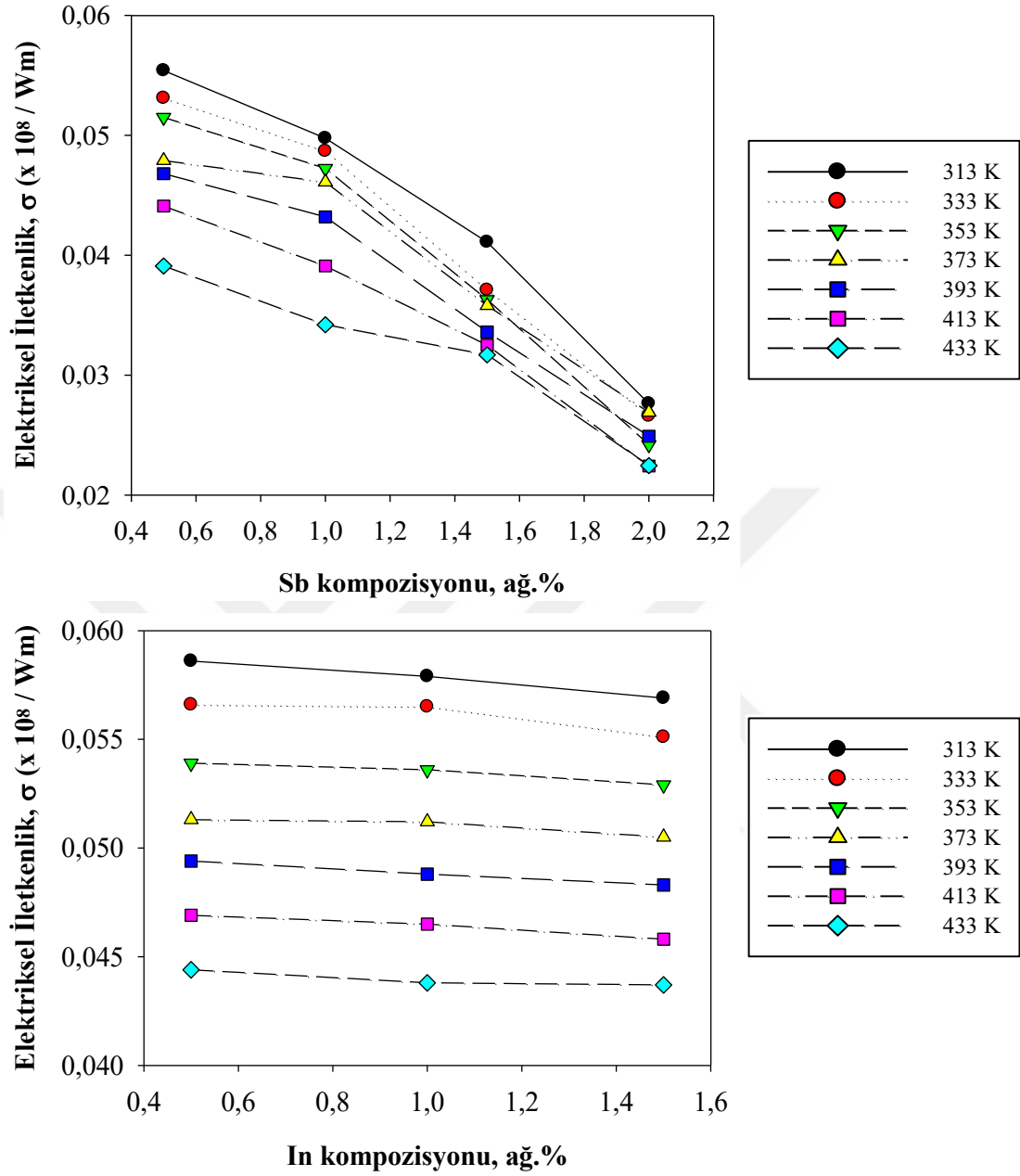
Alaşımların elektriksel iletkenlik eğrileri saf metaller arasında uzanmış ve saf Sn eğrisine yaklaşmıştır. Sistemlerdeki Sb miktarı arttıkça ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri saf Sb'nin elektriksel iletkenlik çizgisine yakın olduğu görülmüştür. Aynı şekilde In miktarı arttıkça elektriksel iletkenlik değerleri saf In değerine yaklaşmıştır. Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının erime sıcaklığındaki elektriksel iletkenlikleri sırasıyla 0.031, 0.030, 0.030, 0.025, 0.019, 0.037, 0.038 ve 0.036 ($\times 10^8$)/ Ωm olarak hesaplanmış ve Tablo 3.4'de kaydedilmiştir.

Şekil 3.11 (a) ve (b) de Sn-9Zn-4Bi alaşımına farklı oranlarda Sb ve In katkısının bir arada saf Sn, saf Zn, saf Bi, saf Sb ve saf In metallerinin elektriksel iletkenliklerinin sıcaklıkla olan değişimleri verilmiştir. Sb ve In ilave edilmiş alaşımlar incelendiğinde, In ilavesinin elektriksel iletkenliği arttırdığı görülmüştür.



Şekil 3.11. Sn-9Zn-4Bi alaşımına (a) Sb katkısının ve (b) In katkısının saf Sn [119], saf Zn [120], saf Bi [119], saf Sb [120] ve saf In [120] metallerinin elektriksel iletkenliklerinin sıcaklıkla olan değişimi.

Şekil 3.12 (a) ve (b) de ise elektriksel iletkenliğin Sb ve In içeriğine ve sıcaklığa olan bağılılığı yer almaktadır. 313, 333, 353, 373, 393, 413 ve 433 K sıcaklıklarındaki elektriksel iletkenlik değerleri Sb ve In içeriğinin artışı ile azalmıştır.



Şekil 3.12. Alaşımların elektriksel iletkenliklerinin (a) Sb içeriğine (b) In içeriğine ve sıcaklığa bağlı değişimi.

3.3.1. Elektriksel İletkenlik Sıcaklık Katsayısının Hesaplanması

Katı bir numunenin elektriksel iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi Denklem 3.9 ile ifade edilirse,

$$\alpha_E = \frac{\sigma_K - \sigma_{K0}}{\sigma_{K0}(T - T_0)} = \frac{1}{\sigma_{K0}} \frac{\Delta\sigma}{\Delta T} \quad (3.9)$$

olur. Burada numunenin T sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik σ_K , $T_0=300$ K sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik σ_{K0} , elektriksel sıcaklık katsayısı ise α_E ile gösterilir [30]. Denklem (3.7)'den elektriksel iletkenlik sıcaklık katsayısının, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'daki grafiğinin eğiminden faydalanarak elde edildiği görülmektedir. Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının erime sıcaklıklarındaki elektriksel iletkenliğin sıcaklık katsayısı değerleri sırasıyla 2.93, 2.28, 2.29, 2.30, 1.75 2.11, 2.13 ve 2.14 ($\times 10^{-3}$) K⁻¹ olarak hesaplanmış ve Tablo 3.4 de kaydedilmiştir.

3.4. Alaşımların Isıl İletkenliğine Elektron ve Fonon Katkısının Belirlenmesi

Metallerde ısı iletkenlik, elektron ve fonon iletiminin bir arada bulunması ve güçlü etkileşim nedeniyle karmaşıktır. Isıl iletkenliğin iki bileşeni vardır: elektronik ve fononik kısımlar. Toplam ısı iletkenlik, bu iki bileşen şeklinde Denklem 3.10 ile şöyle ifade edilir;

$$K_{toplam} = K_e + K_f \quad (3.10)$$

olur. Burada K_e , elektronların termal iletkenliğe katkısı ve K_f , fononların ısı iletkenliğe katkısıdır [121].

Wiedemann-Franz yasasıyla elektriksel ve ısı iletkenlik arasında bir ilişki olduğu söylenir. Serbest valans elektronları elektrik akımının yanı sıra ısı enerjisini de aktarır. Isıl iletkenliğin elektriksel iletkenliğe oranı, belirli bir sıcaklıkta tüm metaller için sabittir. K_e 'nin belirlenmesi Wiedemann-Franz yasası ile Denklem (3.11) ile şu şekilde verilir:

$$\frac{K_e}{\sigma} = LT \quad (3.11)$$

Burada L , Lorenz sayısıdır ve değeri Denklem 3.12'deki gibidir.

$$L = \frac{K}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 = 2.44 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2} \quad (3.12)$$

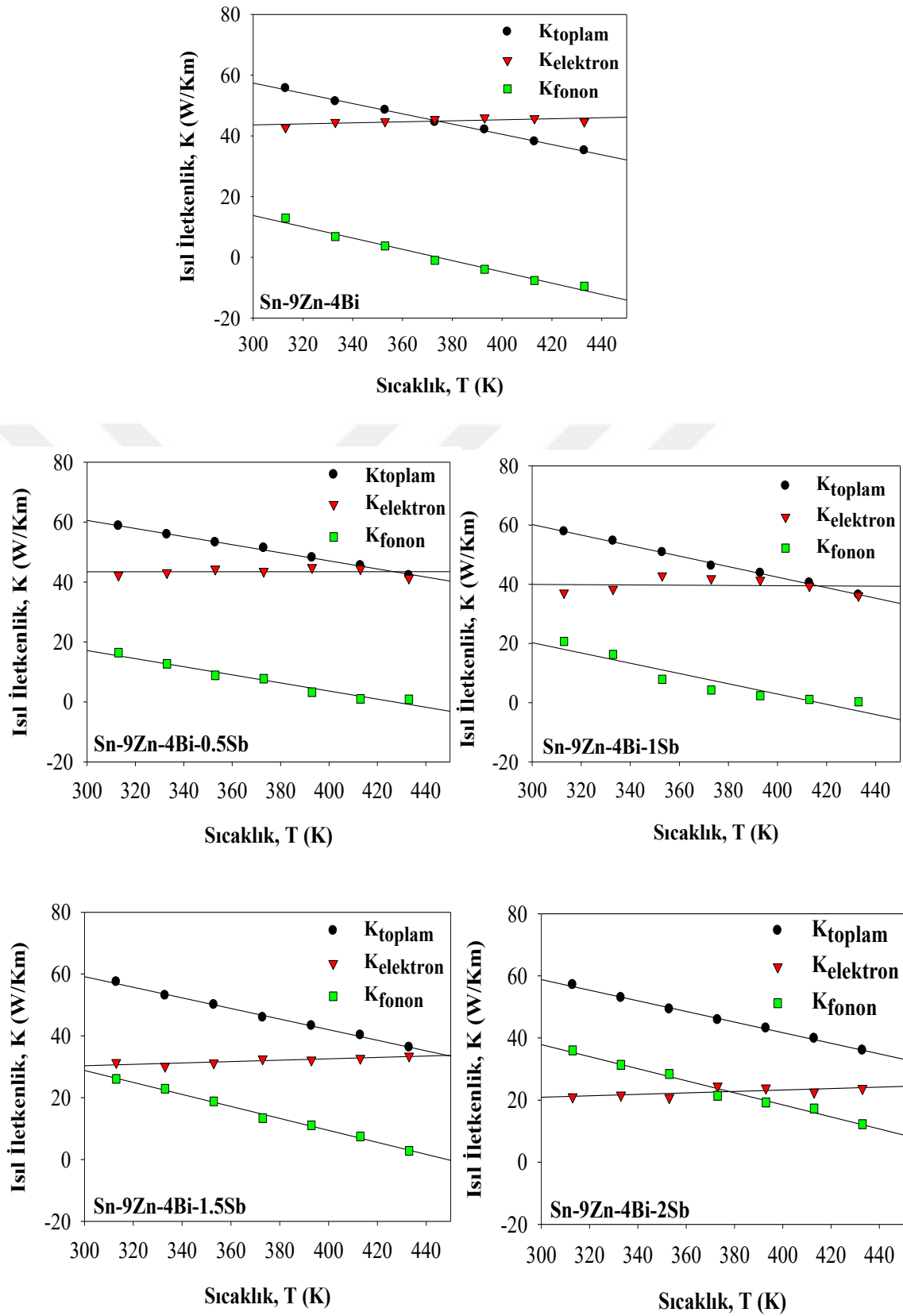
T mutlak sıcaklık, K_e ısı iletkenliğinin elektronik bileşeni ve σ ise elektriksel iletkenliktir.

Fononların ısı iletkenliğe katkısını hesaplayabilmek için dört nokta prob yöntemiyle ölçülen elektriksel iletkenlik değeri (σ) denklem (3.11)'de yerine yazılır. Her bir sıcaklık

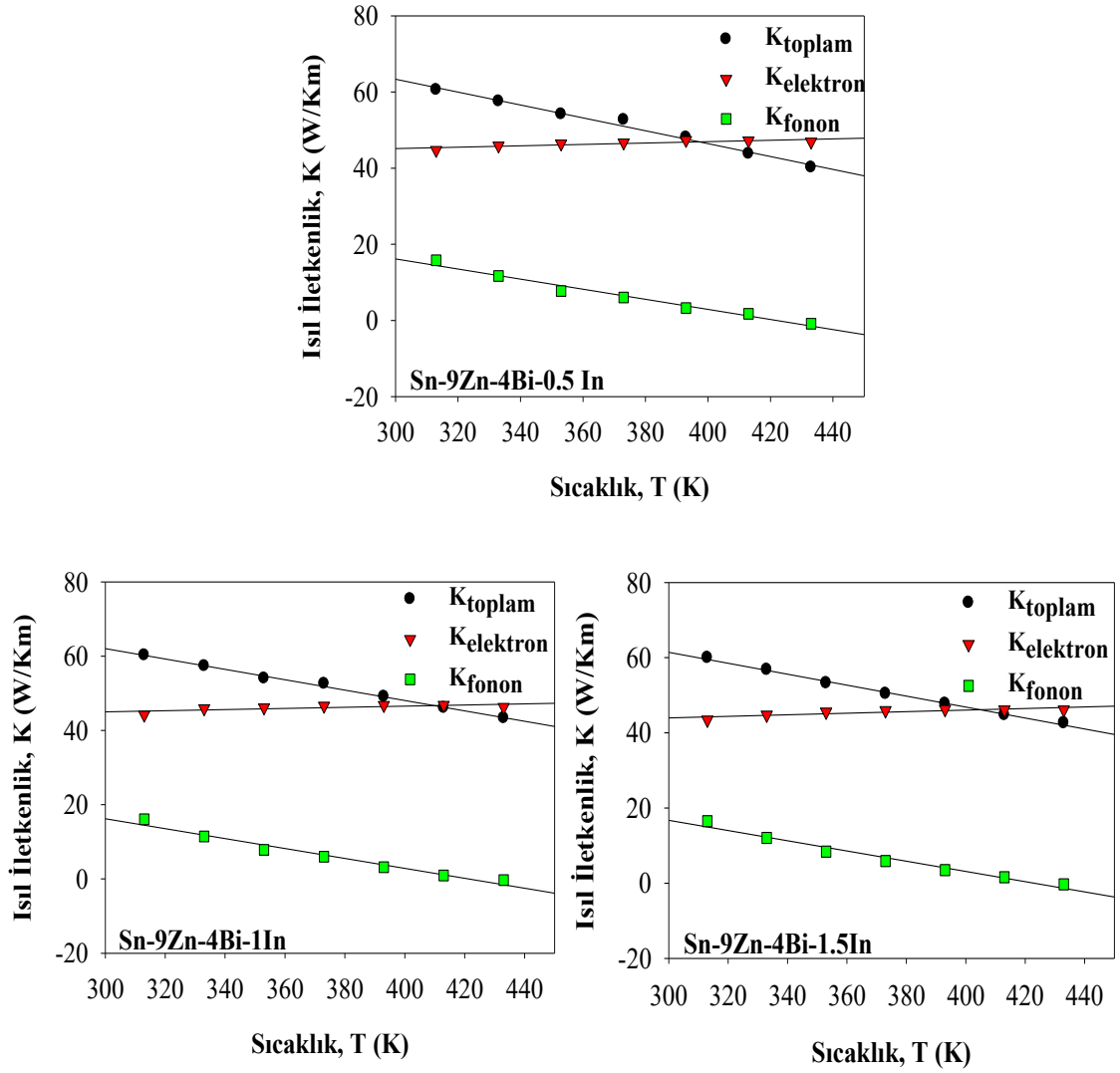
için K_e değeri hesaplanmıştır. Linner ısı akış yöntemiyle her bir alaşımın toplam ısı iletkenlik değeri ölçüldükten sonra Denklem (3.10)'da yerine yazılarak ısı iletimine fononların katkısı hesaplanmıştır.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 da alaşımların toplam ısı iletkenlik ve toplam ısı iletkenliğe elektron ve fonon katkılarının ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi yer almaktadır. Yüksek saflıkta metallerde, elektronların ısı iletkenliğe katkısı fononlardan daha fazladır. Üretilen alaşımlarda elektronların ısı iletkenliğe katkısı fononların ısı iletkenliğe katkısından fazla olduğu Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 de açıkça görülmektedir.





Şekil 3.13. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) lehim alaşımları için ısı iletkenliğe fonon ve elektron katkısının sıcaklıkla değişimi.



Şekil 3.14. Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x=0.5, 1, 1.5$) lehim alaşımları için ısı iletkenliğe fonon ve elektron katkısının sıcaklıkla değişimi.

Bu tez çalışmasında yer alan alaşımların katı fazlarının termal ve elektriksel özellikleri Tablo 3.4 de yer almaktadır.

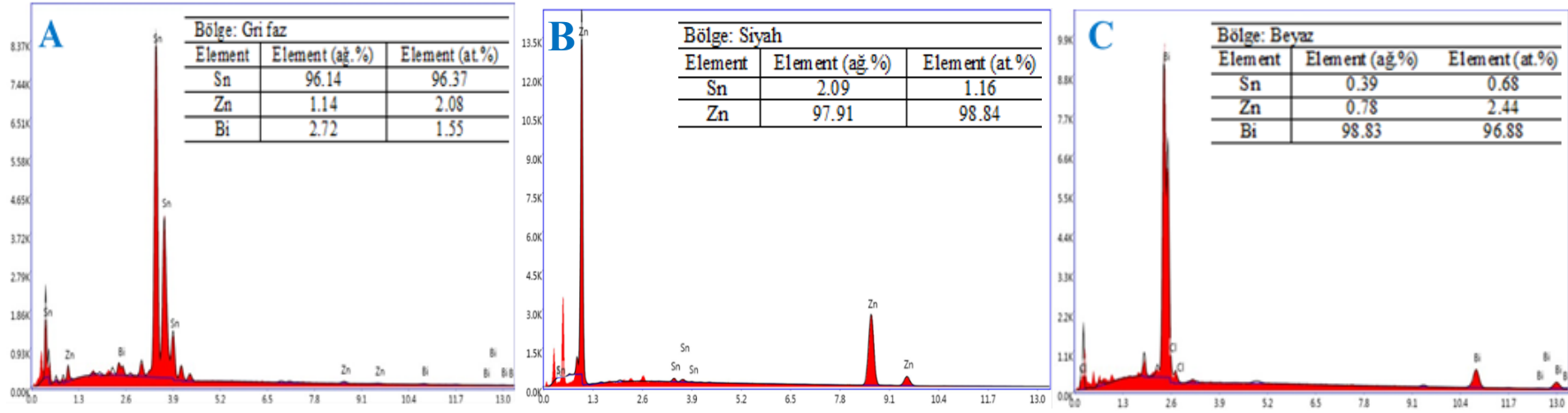
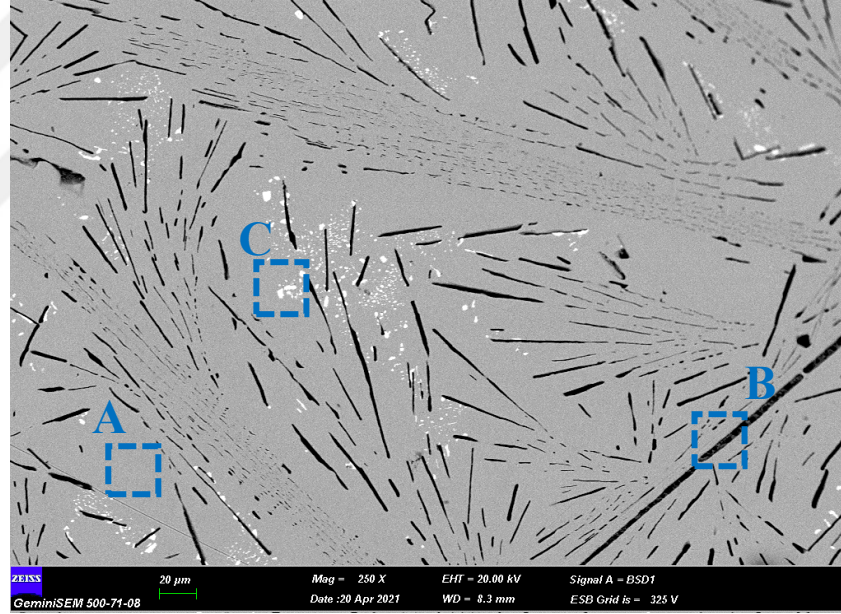
Tablo 3.4 Seçilen kurşunsuz lehim alaşımları için katı fazların erime sıcaklığında elektriksel ve termal özellikleri.

Alaşım (ağ.%)	Erime Sıcaklığı T (K)	Isıl İletkenlik K (W/Km)	Isıl İletkenlik Sıcaklık Katsayısı $\alpha_{TTC} (K^{-1}) \times 10^{-3}$	Elektriksel İletkenlik $\sigma (x10^8/\Omega m)$	Elektriksel İletkenlik Sıcaklık Katsayısı $\alpha_{ETC} (K^{-1}) \times 10^{-3}$
Sn-9Zn-4Bi	477.70	32.89±2.96	2.39	0.031	2.93
Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb	484	35.73±3.21	2.20	0.030	2.28
Sn-9Zn-4Bi-1Sb	482.20	27.60±2.48	2.96	0.030	2.29
Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb	480.50	27.30±2.46	2.99	0.025	2.30
Sn-9Zn-4Bi-2Sb	480.55	27±2.43	3.10	0.019	1.75
Sn-9Zn-4Bi-0.5In	481.62	40.3±3.63	1.87	0.037	2.11
Sn-9Zn-4Bi-1In	481.60	39.96±3.60	1.91	0.038	2.13
Sn-9Zn-4Bi-1.5In	479.21	39.59±3.56	1.94	0.036	2.14

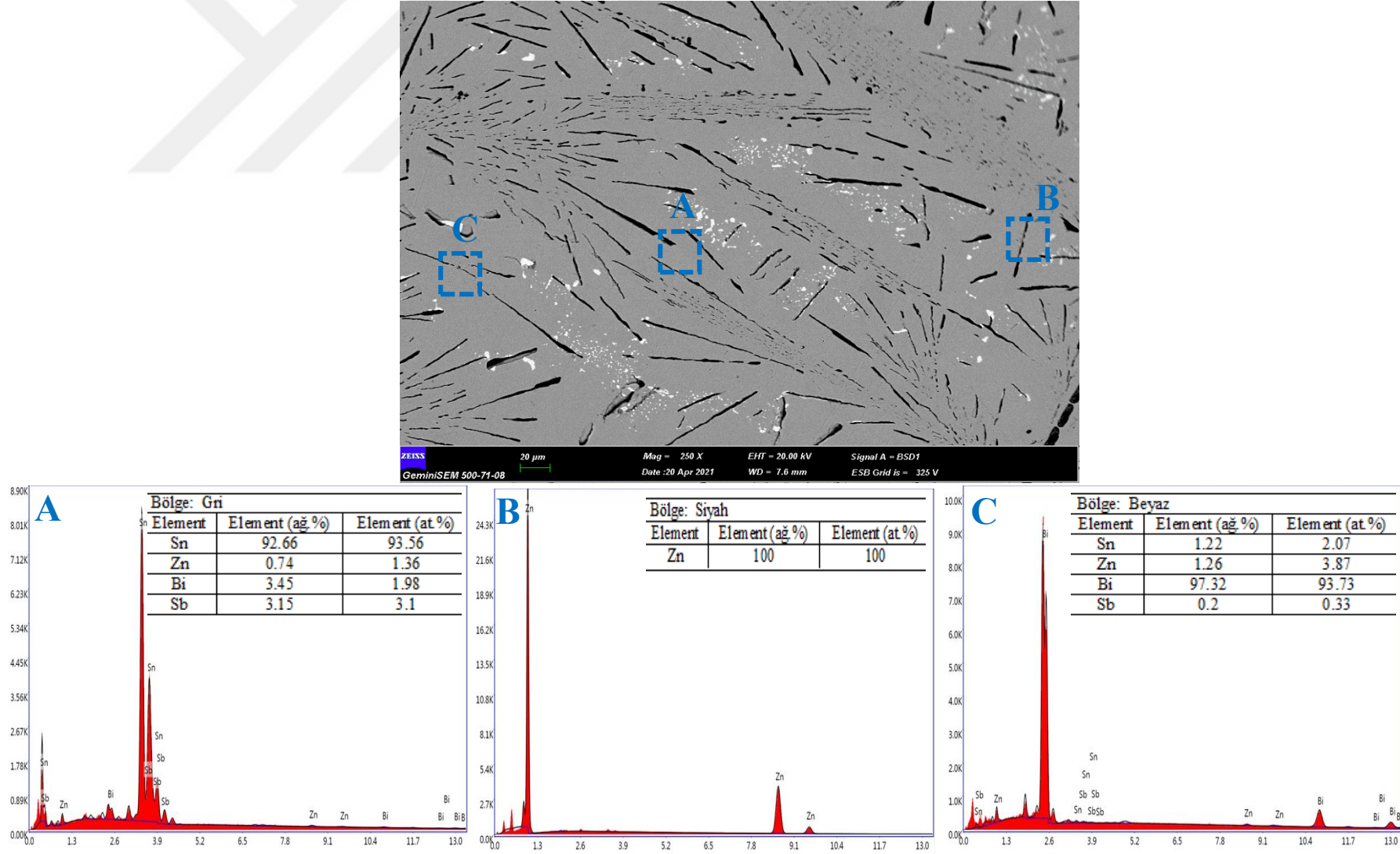
3.5. Alaşımların Mikroyapılarının Tayini

Alaşımların mikroyapısı, önce optik mikroskop sonrasında da taramalı elektron mikroskobu (SEM) boyunca gözlenmiştir. SEM görüntüleri 250X büyütme ile kaydedilmiş ve fazların kimyasal bileşim analizi ise enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile analiz edilmiştir. Numunelerin, mikroskopta gözlenebilmesi için öncelikle zımparalama ve parlatma gibi metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Alaşımların mikroyapılarının SEM görüntüleri ve fazlarının kimyasal bileşim sonuçları Şekil 3.15-3.22 de yer almaktadır.

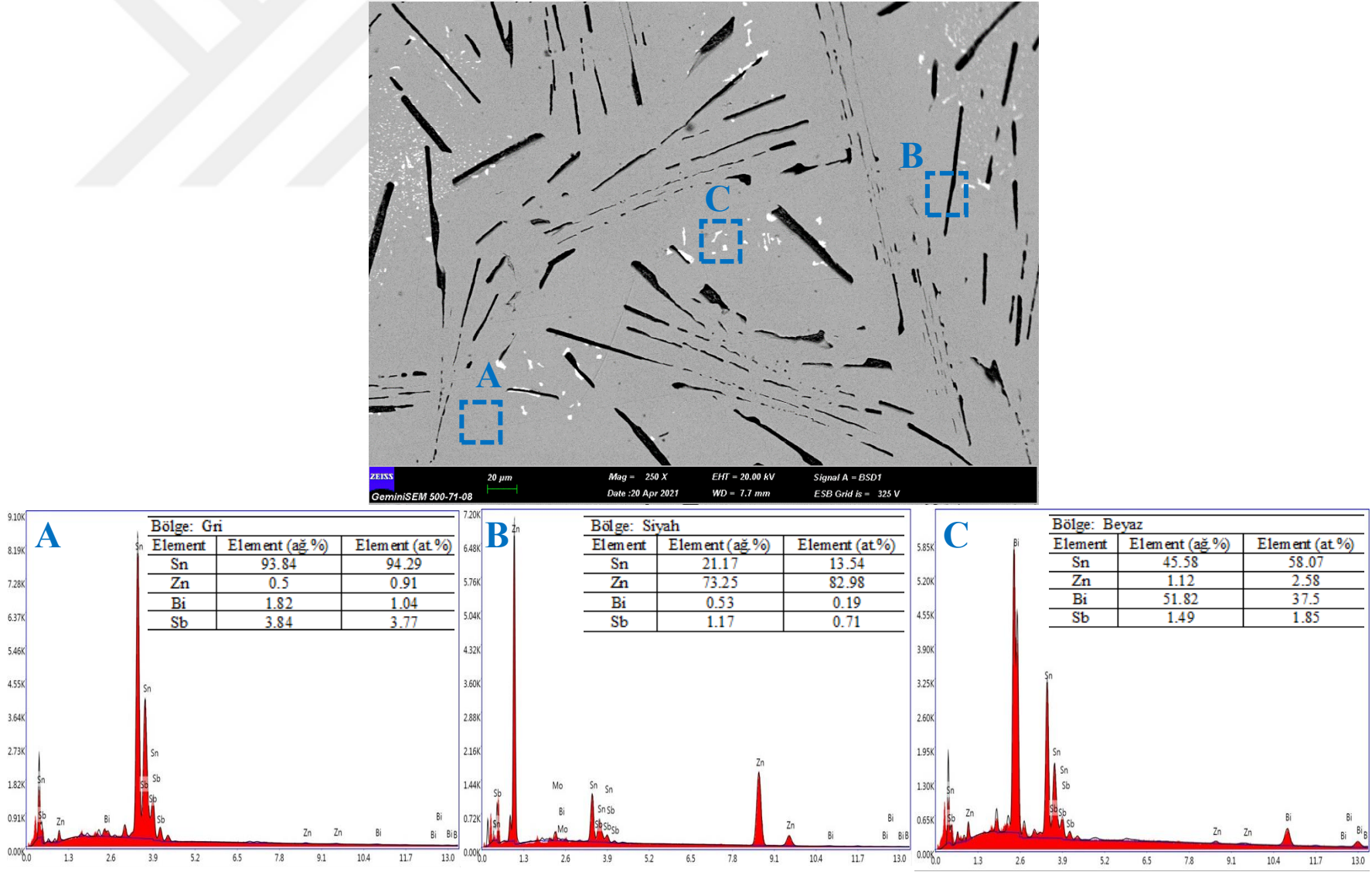
SEM mikroyapı görüntüleri ve EDX analizleri incelendiğinde Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımları içinde üç faz mevcuttur. Bu fazlar, Sn bakımından zengin olan; gri ana faz, Zn bakımından zengin olan; siyah iğne şeklinde olan parçacıklar ve ağırlıkça oranı Bi bakımından zengin olan; beyaz yuvarlak şekilli parçacıklar olarak ifade edilmiştir. Mevcut olan bu fazlar alaşımlar içinde rastgele olacak şekilde dağılmıştır. Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ve In ilavesi fazlar içerisinde düşük oranlarda açığa çıkmıştır. Fakat SEM görüntülerinde Sb ve In metallerini içeren başka bir faz gözlenmemiştir.



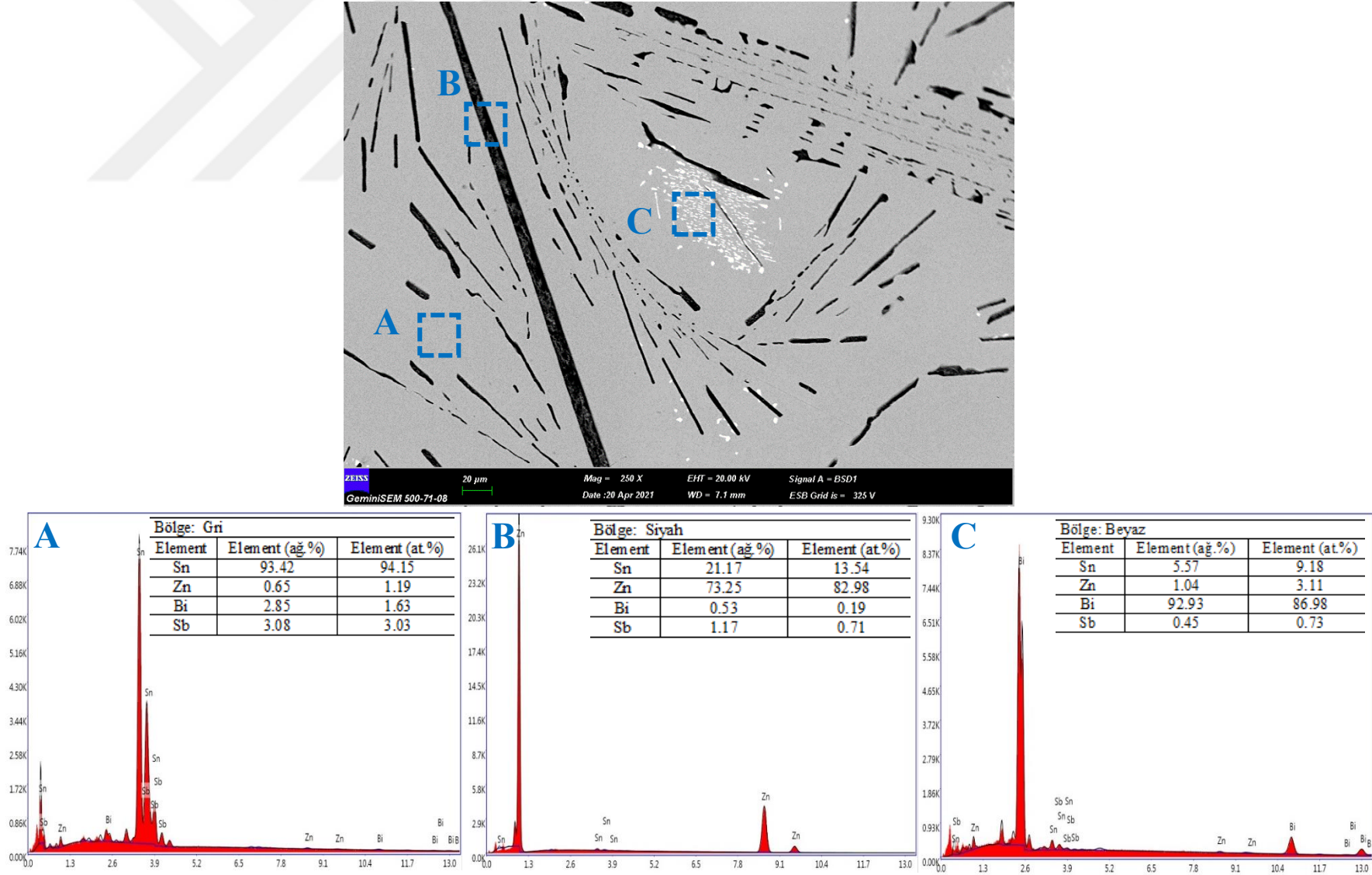
Şekil 3.15. Sn-9Zn-4Bi alaşımlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).



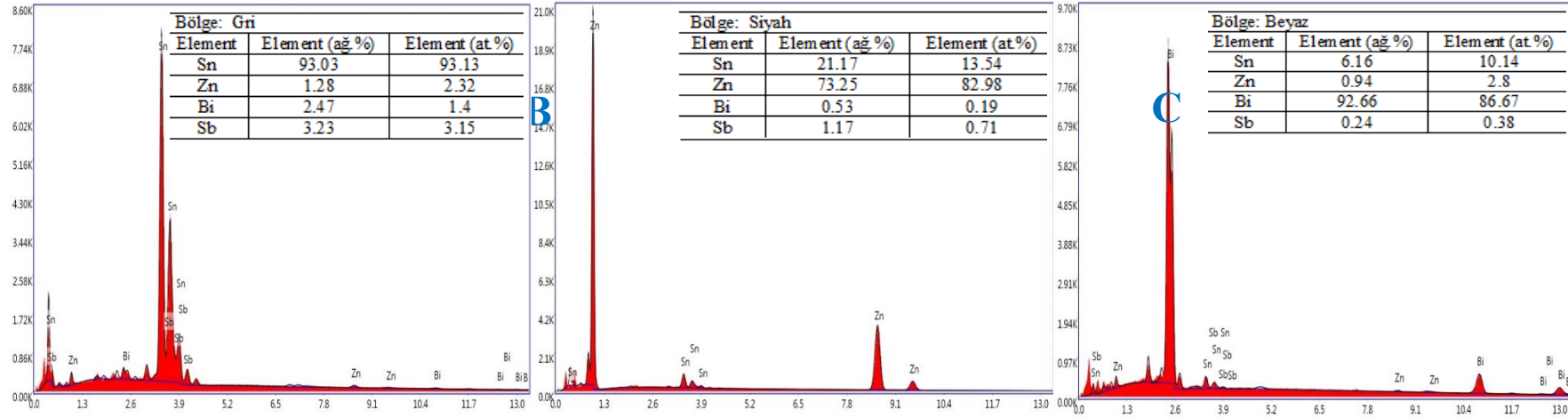
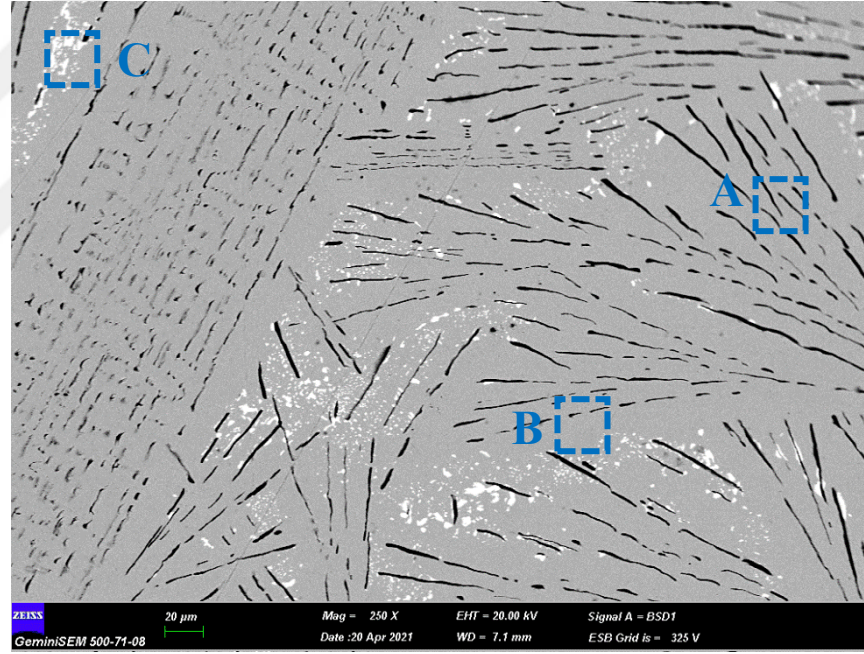
Şekil 3.16. Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).



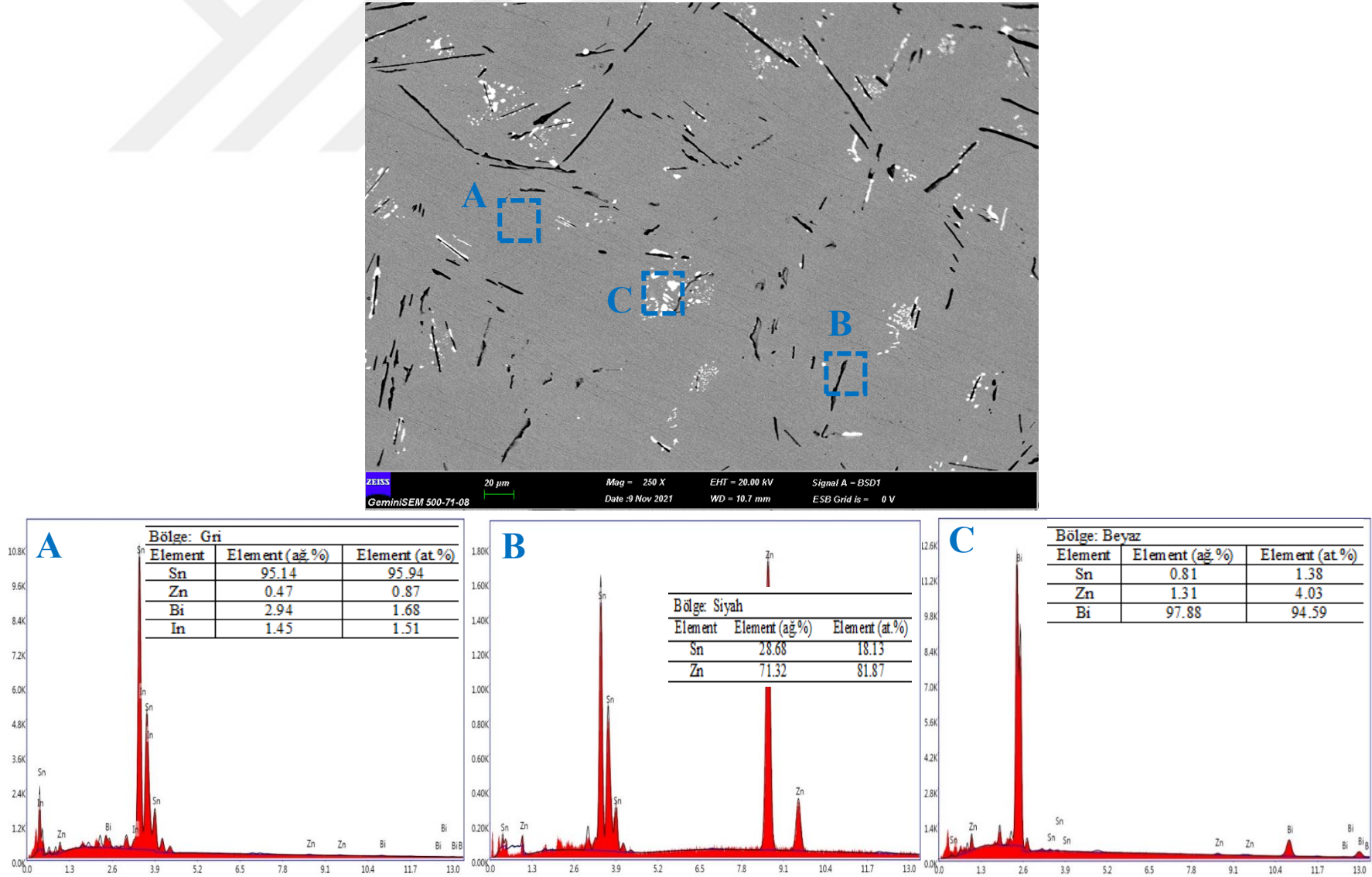
Şekil 3.17. Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaışımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).



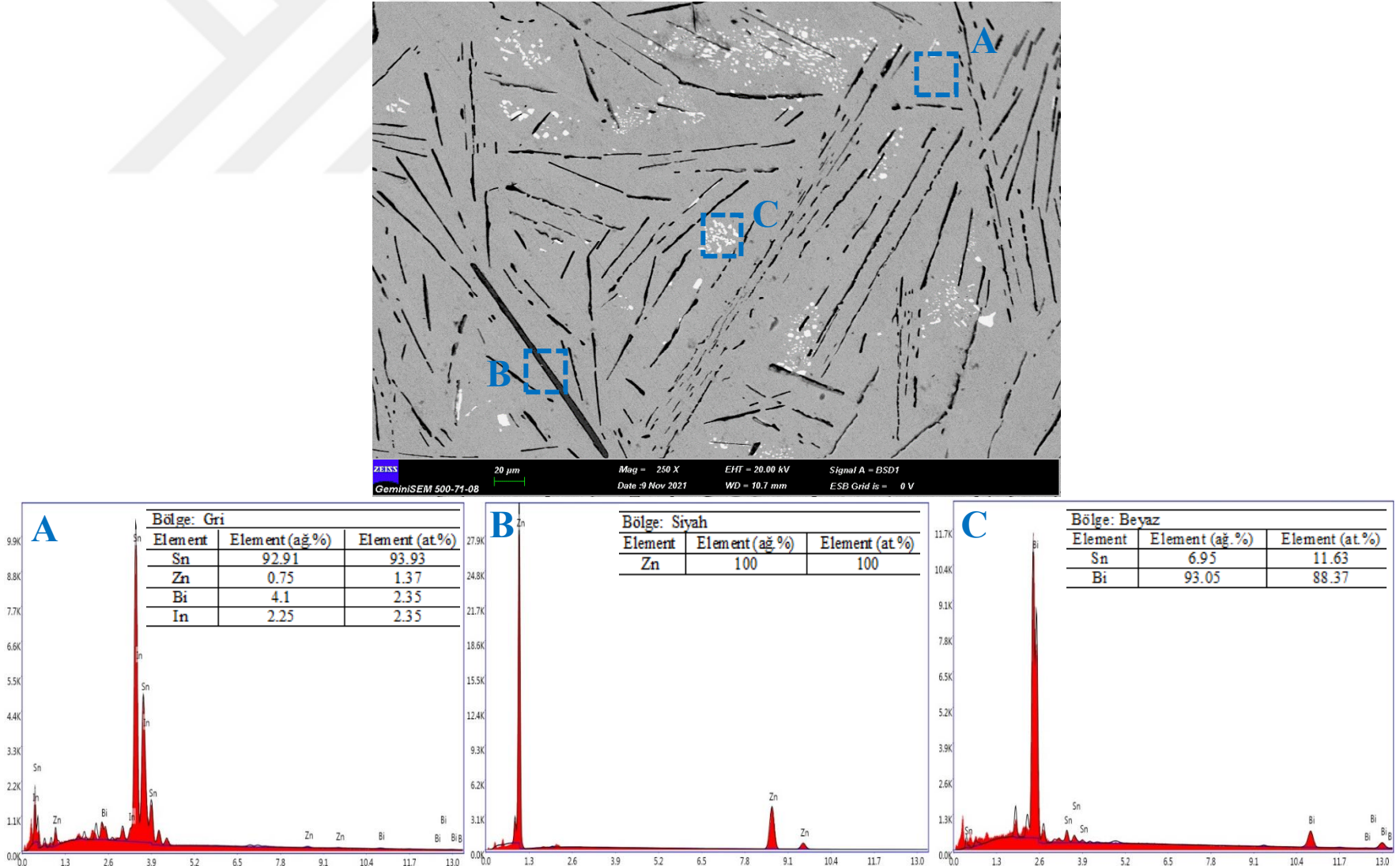
Şekil 3.18. Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb alaışımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).



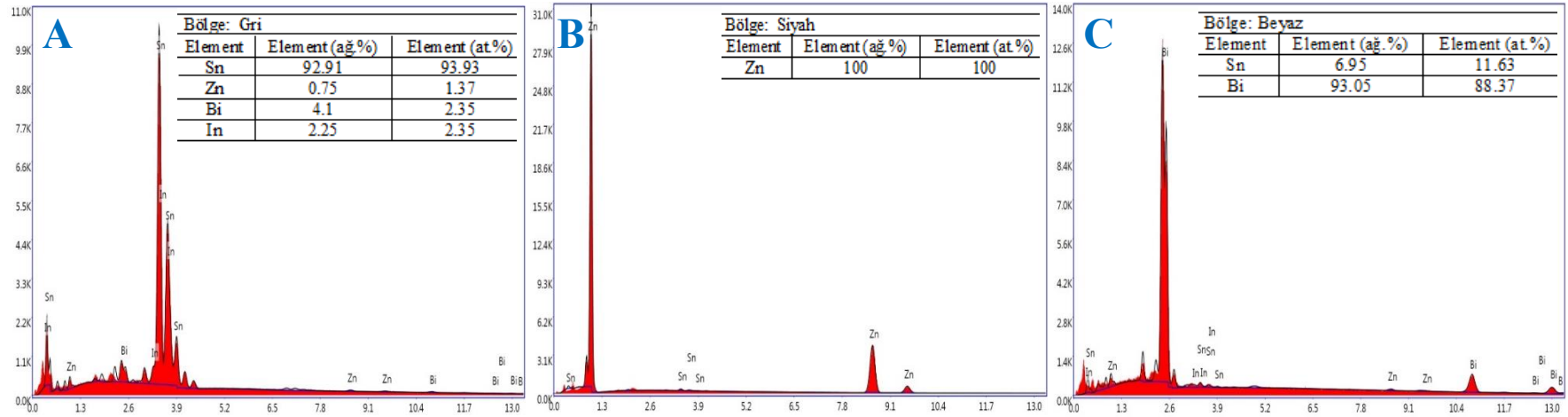
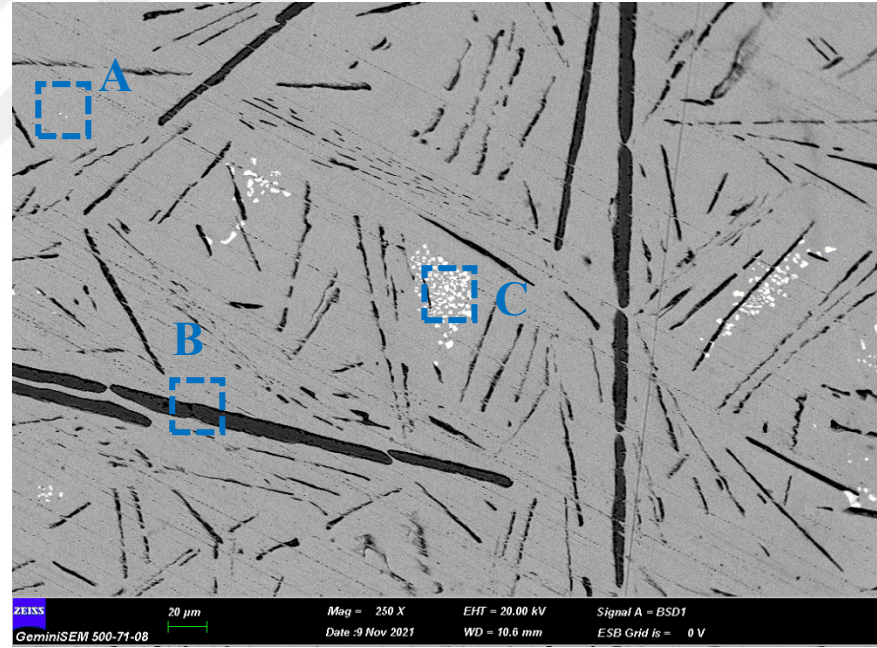
Şekil 3.19. Sn-9Zn-4Bi-2Sb alaışımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).



Şekil 3.20. Sn-9Zn-4Bi-0.5In alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).



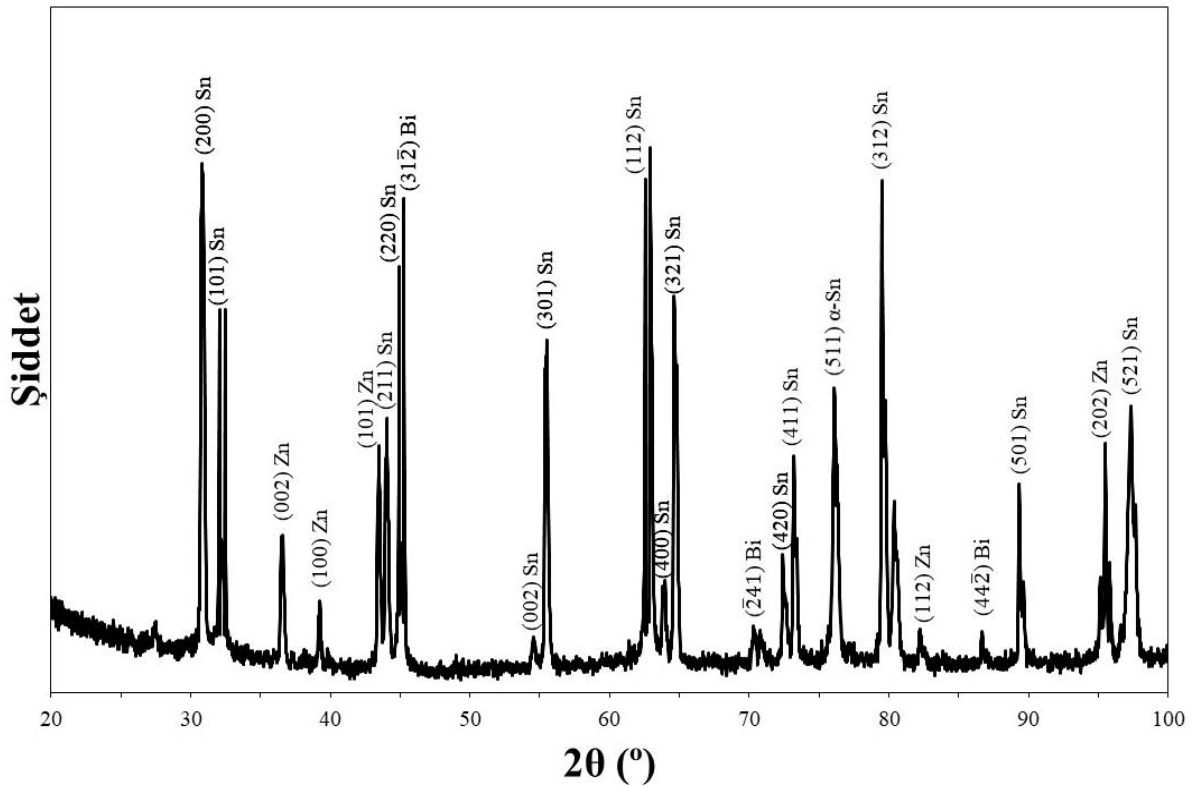
Şekil 3.21. Sn-9Zn-4Bi-1In alaşıımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).



Şekil 3.22. Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşıminin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve fazların kimyasal bileşim analizi (EDX).

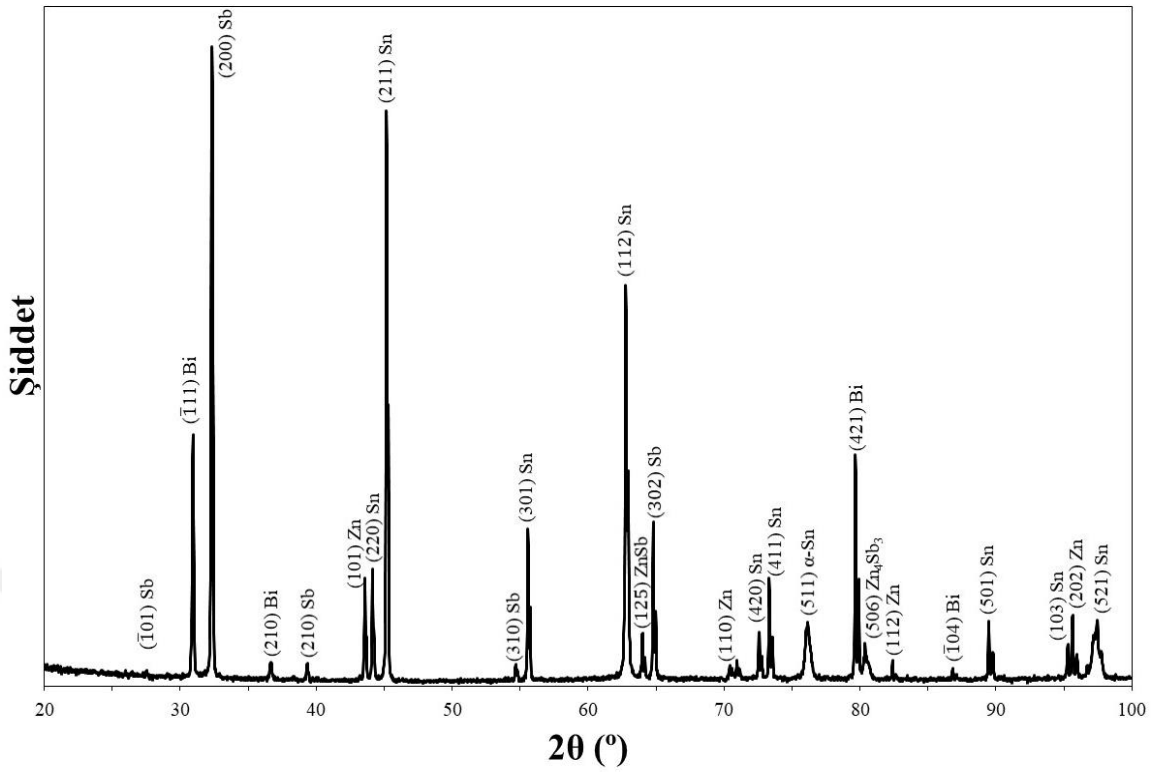
3.6. Alaşımların XRD Ölçümleri

Üretilen alaşımların kristal yapılarını incelemek için XRD ölçümleri yapılmıştır. Alaşımlardan uygun miktarlarda numuneler alınarak $2\theta=20^0$ - 100^0 tarama açısıyla XRD ölçümleri alınmıştır. Elde edilen desenleri analiz etmek için X'Pert HighScore Plus paket programı kullanılmıştır. Alaşımlara ait olan her XRD deseni, kristal sistemi, kafes parametreleri, Miller indisleri (h, k, l) ve düzlemler arası uzaklık (d) değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.23-3.32 da alaşımların XRD desenleri yer almaktadır. Şekil 3.23 de Sn-9Zn-4Bi lehim alaşımının X-ışını kırınım grafiğinden tetragonal Sn, monoklinik Bi, hegzagonal Zn ve kübik α -Sn fazları gözlenmiştir.



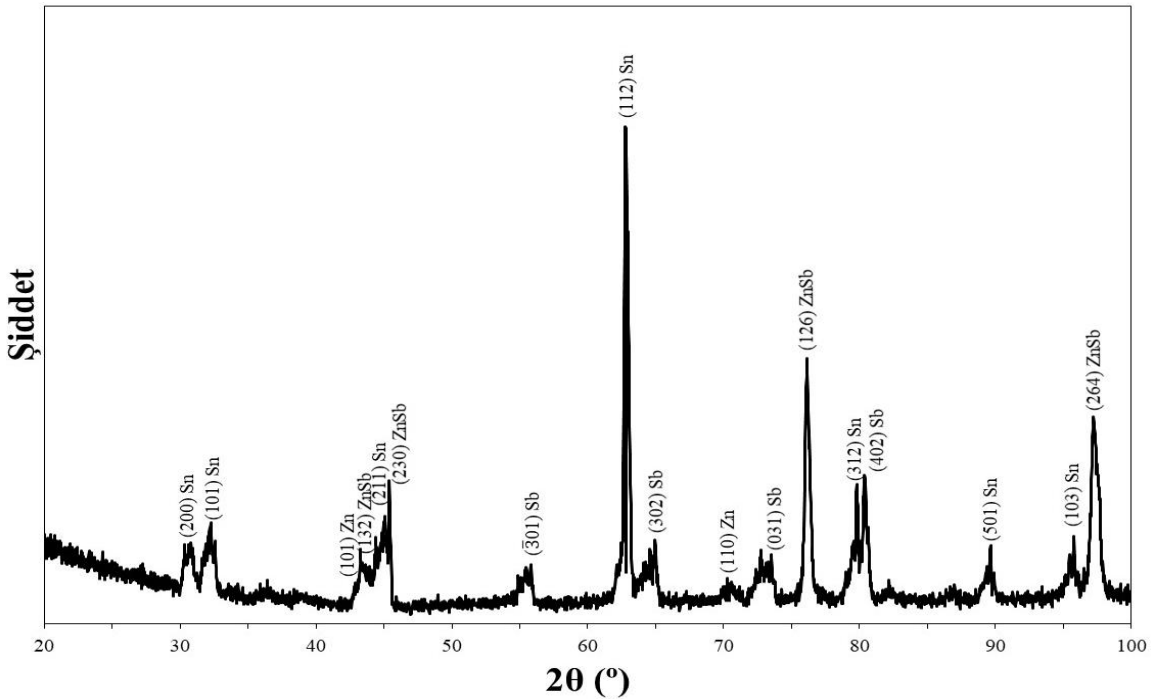
Şekil 3.23. Sn-9Zn-4Bi lehim alaşımının XRD sonuçları.

Şekil 3.24 de Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb lehim alaşımının XRD deseni yer almaktadır. Sn-9Zn-4Bi alaşımına 0.5 ağırlık % Sb ilavesiyle tetragonal Sn, monoklinik Bi, hegzagonal Zn, kübik α -Sn fazlarının yanı sıra yüksek ve düşük şiddette monoklinik Sb pikleri bulunmuştur. Bunun yanında ortorombik Zn_4Sb_3 ve ortorombik ZnSb intermetalikleri gözlenmiştir.



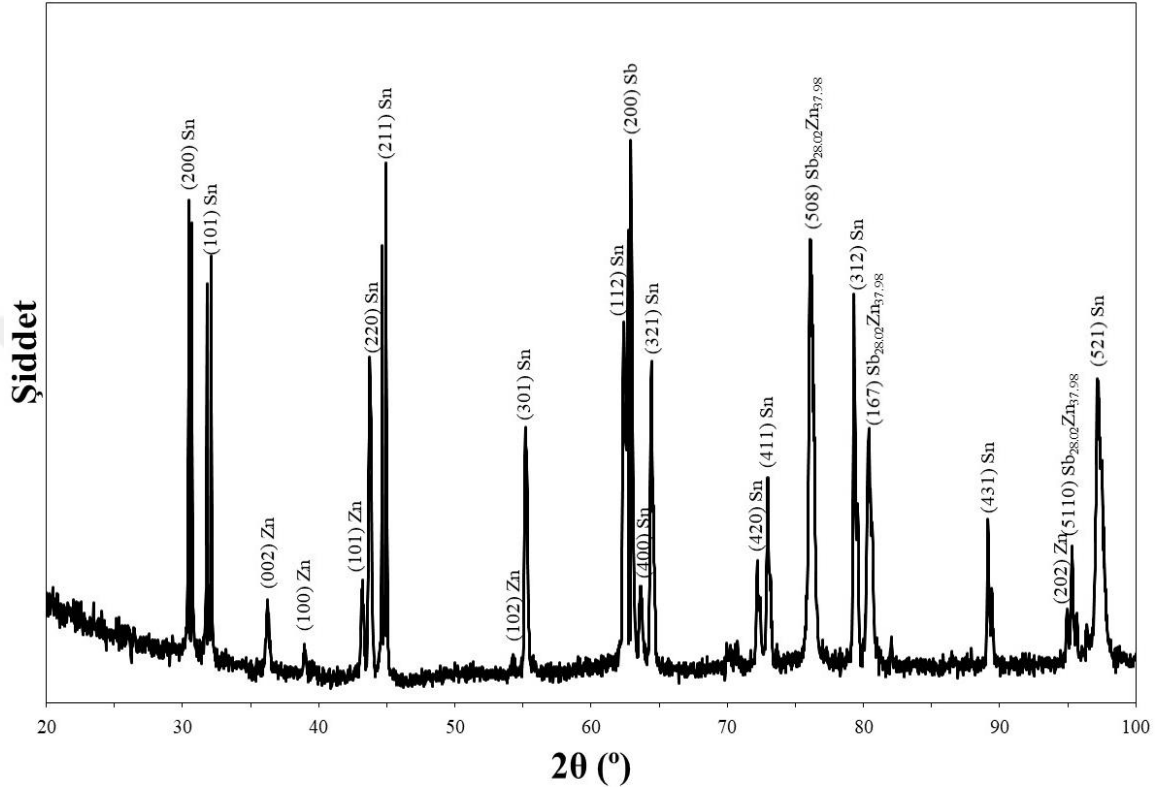
Şekil 3.24. Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb lehim alaşımlarının XRD sonuçları.

Şekil 3.25 de Sn-9Zn-4Bi-1Sb lehim alaşımlarının XRD deseni yer almaktadır. Sn-9Zn-4Bi alaşımlarına 1 ağırlık % Sb ilavesiyle tetragonal Sn, hegzagonal Zn, kübik ve monoklinik Sb pikleri ve ortorombik ZnSb fazları bulunmuştur.



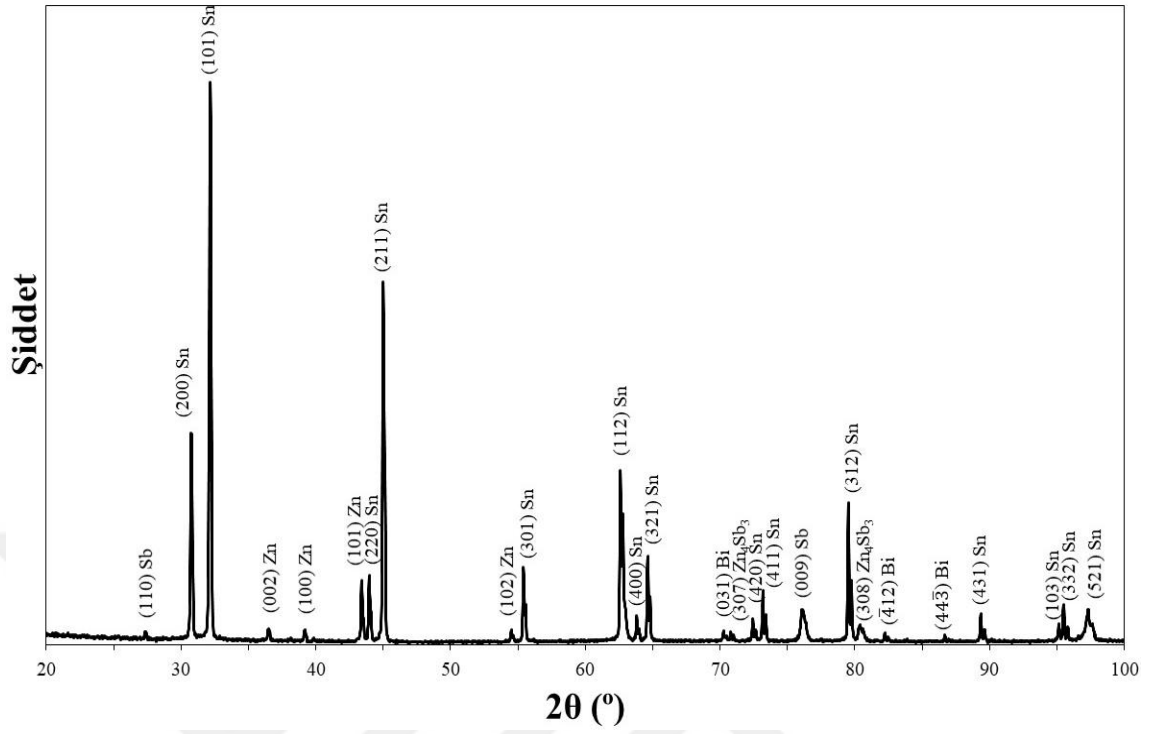
Şekil 3.25. Sn-9Zn-4Bi-1Sb lehim alaşımlarının XRD sonuçları.

Şekil 3.26 da Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb lehim alaşımlarının XRD deseni yer almaktadır. Sn-9Zn-4Bi alaşımına 1.5 ağırlık % Sb ilavesiyle tetragonal Sn, hegzagonal Zn, kübik Sb ve rombohedral $Sb_{28.02}Zn_{37.98}$ fazları bulunmuştur.

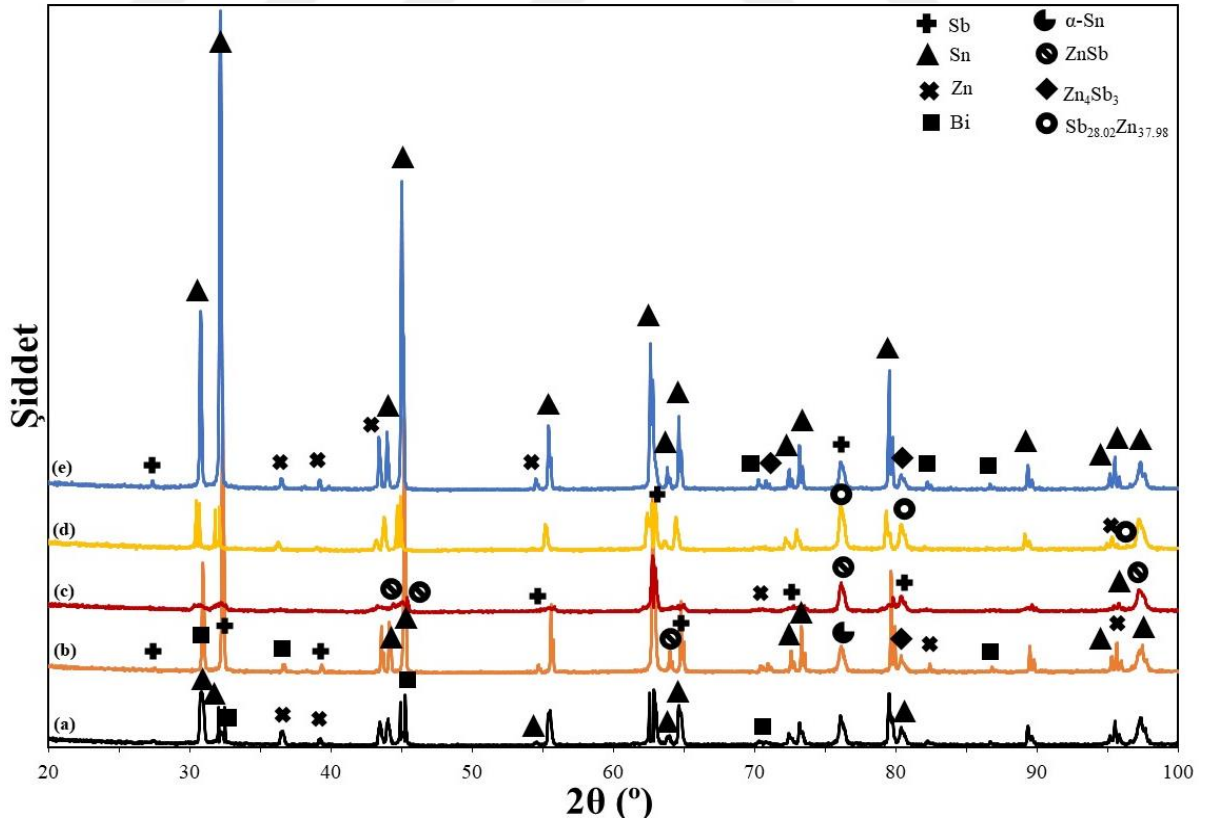


Şekil 3.26. Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb lehim alaşımlarının XRD sonuçları.

Şekil 3.27 de Sn-9Zn-4Bi-2Sb lehim alaşımlarının XRD deseni yer almaktadır. Sn-9Zn-4Bi alaşımına 2 ağırlık % Sb ilavesiyle tetragonal Sn, hegzagonal Zn, monoklinik Bi, kübik, rombohedral ve monoklinik Sb pikleri, ortorombik $ZnSb$ ve Zn_4Sb_3 fazları gözlenmiştir. Şekil 3.28 de Sn-9Zn-4Bi alaşımına ağırlıkça yüzde 0.5, 1, 1.5, 2 oranlarında Sb ilavesiyle üretilen alaşımların XRD analiz sonuçları yer almaktadır. Piklerin fazlarla eşleşmesini ve Sb katkısıyla açığa çıkan değişiklikleri daha net yorumlamak açısından alaşımların XRD bulguları bir arada verilmiştir.

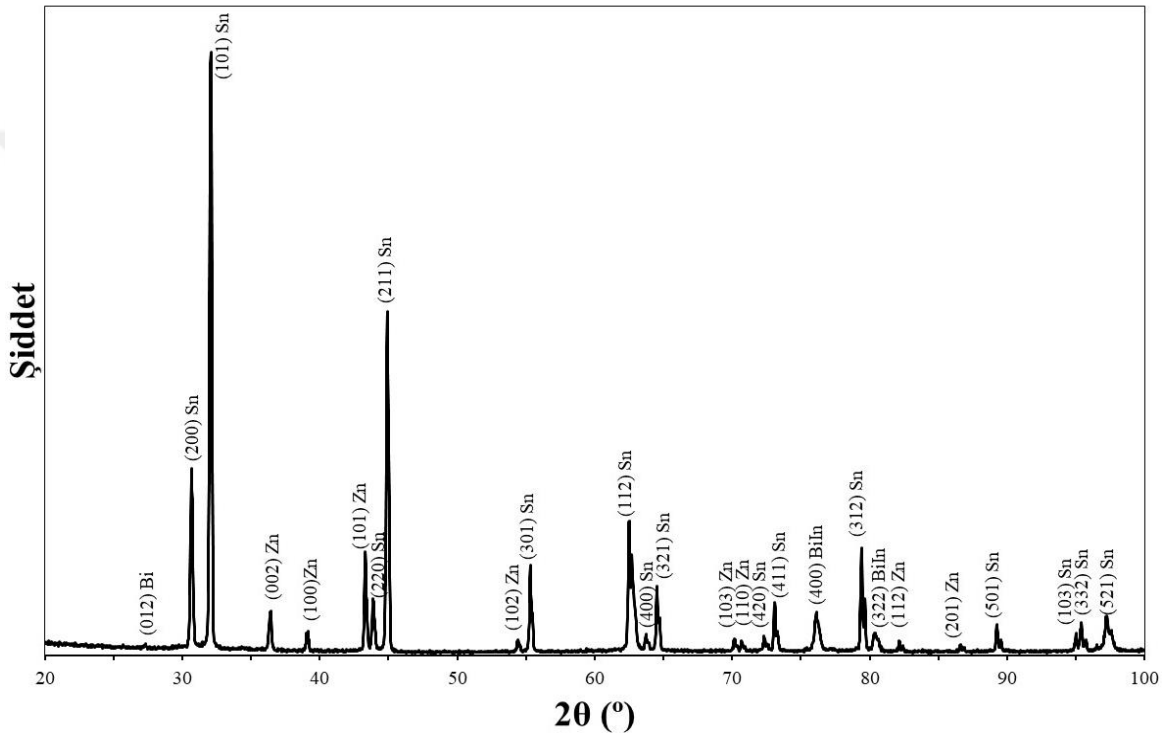


Şekil 3.27. Sn-9Zn-4Bi-2Sb lehim alaşımlarının XRD sonuçları.



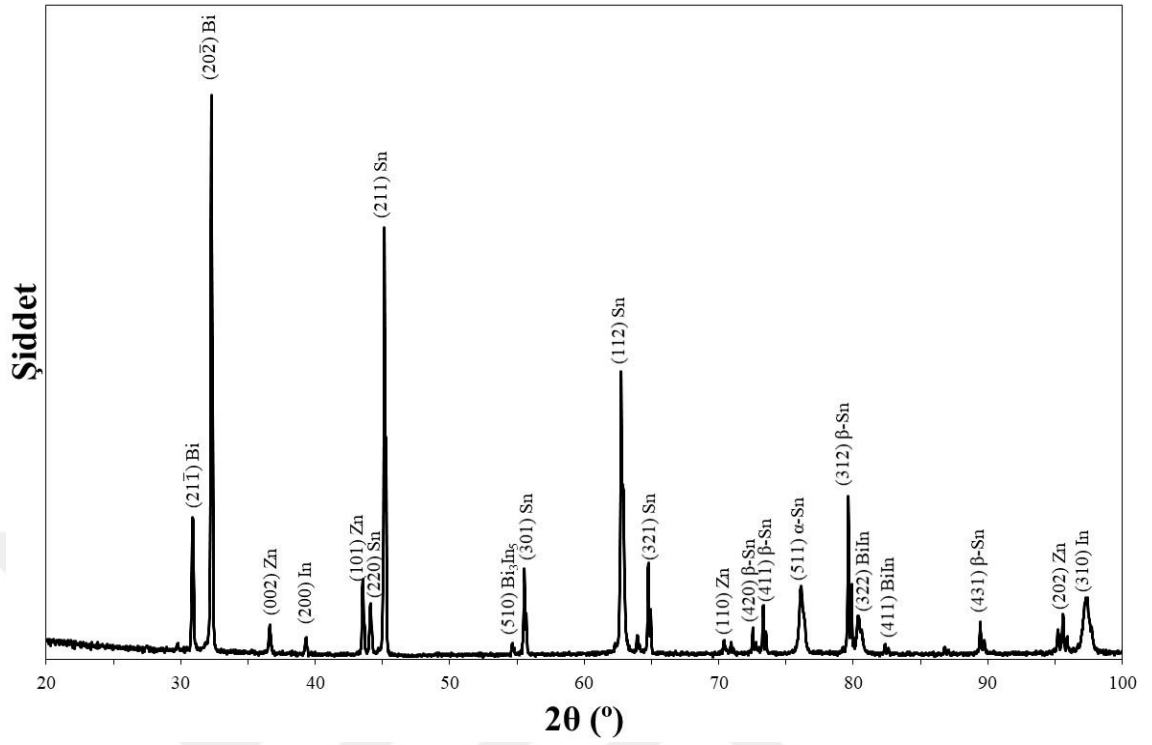
Şekil 3.28. (a) Sn-9Zn-4Bi (b) Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb (c) Sn-9Zn-4Bi-1Sb (d) Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb (e) Sn-9Zn-4Bi-2Sb lehim alaşımlarının XRD desenleri.

Şekil 3.29 da Sn-9Zn-4Bi-0.5In lehim alaşıımının XRD deseni yer almaktadır. Sn-9Zn-4Bi alaşıımına 0.5 ağı. % In ilavesiyle tetragonal Sn, hegzagonal Zn, rombohedral Bi ve tetragonal BiIn fazları gözlenmiştir. Şekil 3.30 da Sn-9Zn-4Bi-1In lehim alaşıımının XRD deseni yer almaktadır. Sn-9Zn-4Bi alaşıımına 1 ağı. % In ilavesiyle oluşan pikler tetragonal Sn, hegzagonal Zn, monoklinik Bi, tetragonal In, kübik α -Sn, tetragonal β -Sn, tetragonal BiIn ve Bi₃In₅ fazları ile eşleştirilmiştir.

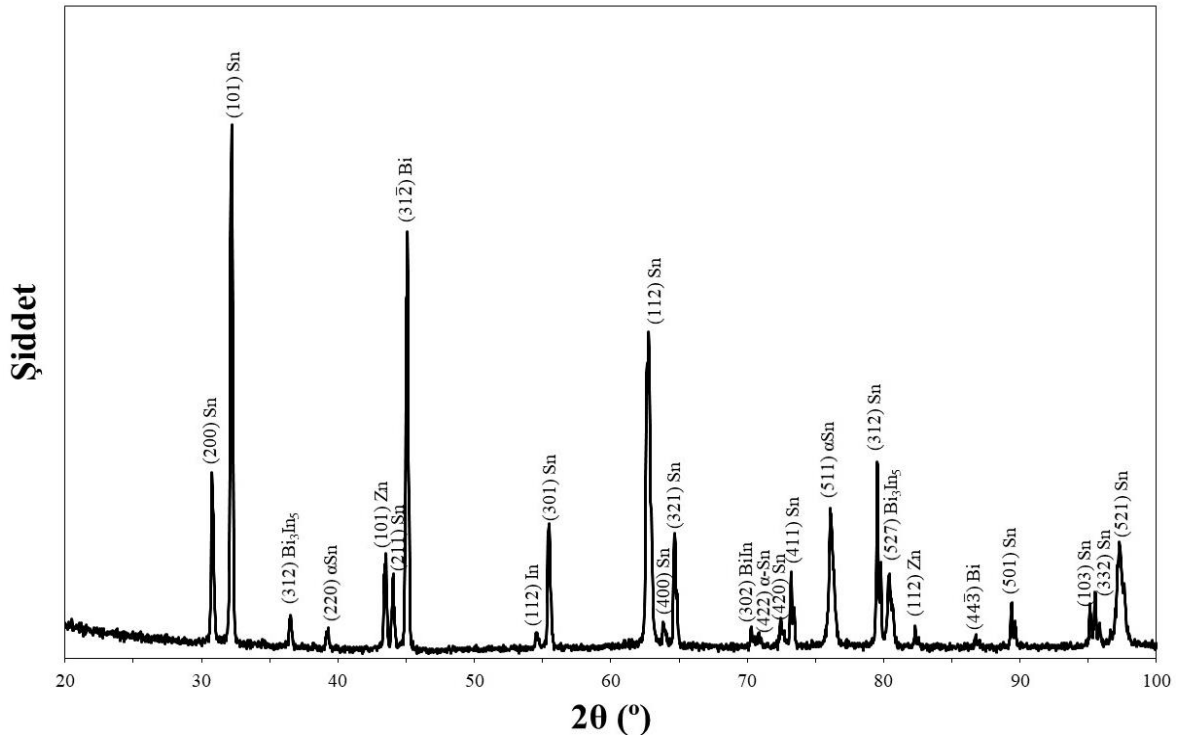


Şekil 3.29. Sn-9Zn-4Bi-0.5In lehim alaşıımının XRD sonuçları.

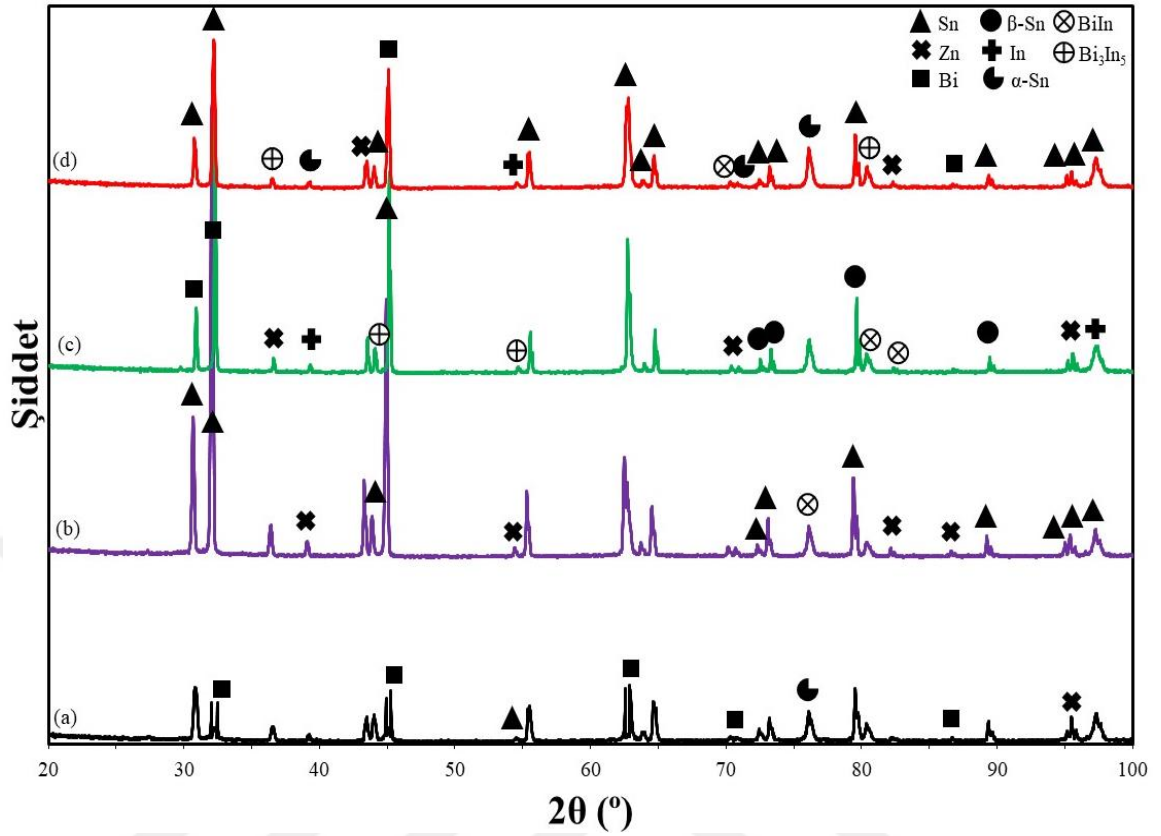
Şekil 3.31 de Sn-9Zn-4Bi-1.5In lehim alaşıımının XRD deseni yer almaktadır. Sn-9Zn-4Bi alaşıımına 1.5 ağı. % In ilavesiyle tetragonal Sn, hegzagonal Zn, monoklinik Bi, tetragonal In, kübik α -Sn, tetragonal β -Sn, tetragonal BiIn ve Bi₃In₅ fazları bulunmuştur. Şekil 3.32 de Sn-9Zn-4Bi alaşıımına ağırlıkça yüzde 0.5, 1, 1.5 oranlarında In ilavesiyle üretilen alaşıımların XRD analiz sonuçları yer almaktadır. Piklerin fazlarla eşleşmesini ve In katkısıyla açığa çıkan değişiklikleri daha net yorumlamak açısından alaşıımların XRD bulguları bir arada verilmiştir.



Şekil 3.30. Sn-9Zn-4Bi-1In lehim alaşıımının XRD sonuçları.



Şekil 3.31. Sn-9Zn-4Bi-1.5In lehim alaşıımının XRD sonuçları.



Şekil 3.32. (a) Sn-9Zn-4Bi (b) Sn-9Zn-4Bi-0.5In (c) Sn-9Zn-4Bi-1In (d) Sn-9Zn-4Bi-1.5In lehim alaşımlarının XRD desenleri.

Alaşımların fazları, kristal sistemleri, kafes parametreleri ve c/a oranı Tablo 3.5 ve Tablo 3.6 da yer almaktadır.

Tablo 3.5. Sn-9Zn-4Bi ve Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0.5, 1, 1.5, 2) lehim alaşımlarının XRD analiz sonuçları.

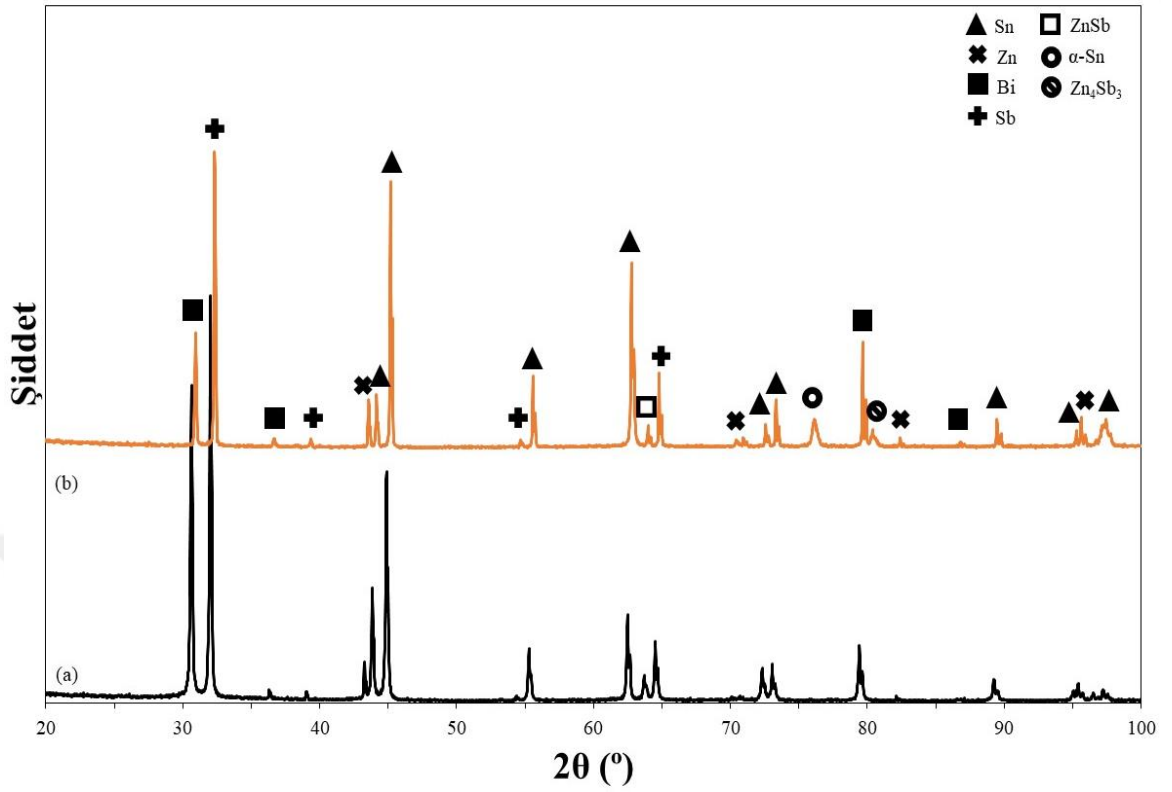
Alaşım	Faz	Kristal Yapı	Örgü Parametresi (Å), a	Örgü Parametresi (Å), b	Örgü Parametresi (Å), c	c/a
Sn-9Zn-4Bi	Sn	Tetragonal	5.8310	5.8310	3.1820	0.5455
	Zn	Hegzagonal	2.6591	2.6591	4.9353	1.8560
	Bi	Monoklinik	6.4680	6.5780	6.4680	1
	α -Sn	Kübik	6.4892	6.4892	6.4892	1
Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb	Sn	Tetragonal	5.8190	5.8190	3.1753	0.5457
	Bi	Monoklinik	6.0500	4.2000	4.6500	0.7686
	Sb	Monoklinik	5.5600	4.0400	4.2200	0.7590
	Zn	Hegzagonal	2.6591	2.6591	4.9353	1.8560
	α -Sn	Kübik	6.4892	6.4892	6.4892	1
	ZnSb	Ortorombik	6.2180	7.7410	8.1150	1.3051
	Zn ₄ Sb ₃	Ortorombik	7.9810	7.4950	10.7200	1.3432
Sn-9Zn-4Bi-1Sb	Sn	Tetragonal	5.8190	5.8190	3.1753	0.5457
	Zn	Hegzagonal	2.6650	2.6650	4.9470	1.8563
	Sb	Monoklinik	5.5600	4.0400	4.2200	0.7590
	ZnSb	Ortorombik	6.2180	7.7410	8.1150	1.3051
Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb	Sn	Tetragonal	5.8332	5.8332	3.1820	0.5455
	Zn	Hegzagonal	2.6650	2.6650	4.9470	1.8563
	Sb	Kübik	2.9600	2.9600	2.9600	1
	Sb _{28.02} Zn _{37.98}	Rombohedral	12.2330	12.2330	12.4280	1.0159
Sn-9Zn-4Bi-2Sb	Sn	Tetragonal	5.8310	5.8310	3.1820	0.5457
	Bi	Monoklinik	6.4680	6.5780	6.4680	1
	Zn	Hegzagonal	2.6591	2.6591	4.9353	1.8560
	Zn ₄ Sb ₃	Ortorombik	7.9810	7.4950	10.7200	1.3432

Tablo 3.6. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0.5, 1, 1.5) lehim alaşımlarının XRD analiz sonuçları.

Alaşım	Faz	Kristal Yapı	Örgü Parametresi (Å), a	Örgü Parametresi (Å), b	Örgü Parametresi (Å), c	c/a
Sn-9Zn-4Bi-0.5In	Sn	Tetragonal	5.8332	5.8332	3.1820	0.5455
	Zn	Hegzagonal	2.6649	2.6649	4.9468	1.8563
	Bi	Rombohedral	4.5350	4.5350	11.8140	2.6051
	BiIn	Tetragonal	4.9979	4.9979	4.7116	0.9427
Sn-9Zn-4Bi-1In	Sn	Tetragonal	5.8190	5.8190	3.1753	0.5457
	Zn	Hegzagonal	2.6591	2.6591	4.9353	1.8560
	Bi	Monoklinik	6.4680	6.5780	6.4680	1
	In	Tetragonal	4.5800	4.5800	4.8600	1.0611
	α -Sn	Kübik	6.4890	6.4890	6.4890	1
	β -Sn	Tetragonal	5.8316	5.8316	3.1813	0.5455
	BiIn	Tetragonal	4.9901	4.9901	4.6527	0.9324
	Bi ₃ In ₅	Tetragonal	8.5440	8.5440	12.6800	1.4840
Sn-9Zn-4Bi-1.5In	Sn	Tetragonal	5.8310	5.8310	3.1820	0.5457
	Zn	Hegzagonal	2.6649	2.6649	4.9468	1.8563
	Bi	Monoklinik	6.4680	6.5780	6.4680	1
	In	Tetragonal	3.2522	3.2522	4.9507	1.5222
	α -Sn	Kübik	6.4892	6.4892	6.4892	1
	BiIn	Tetragonal	4.9732	4.9732	4.5524	0.9154
	Bi ₃ In ₅	Tetragonal	8.5440	8.5440	12.6800	1.4841

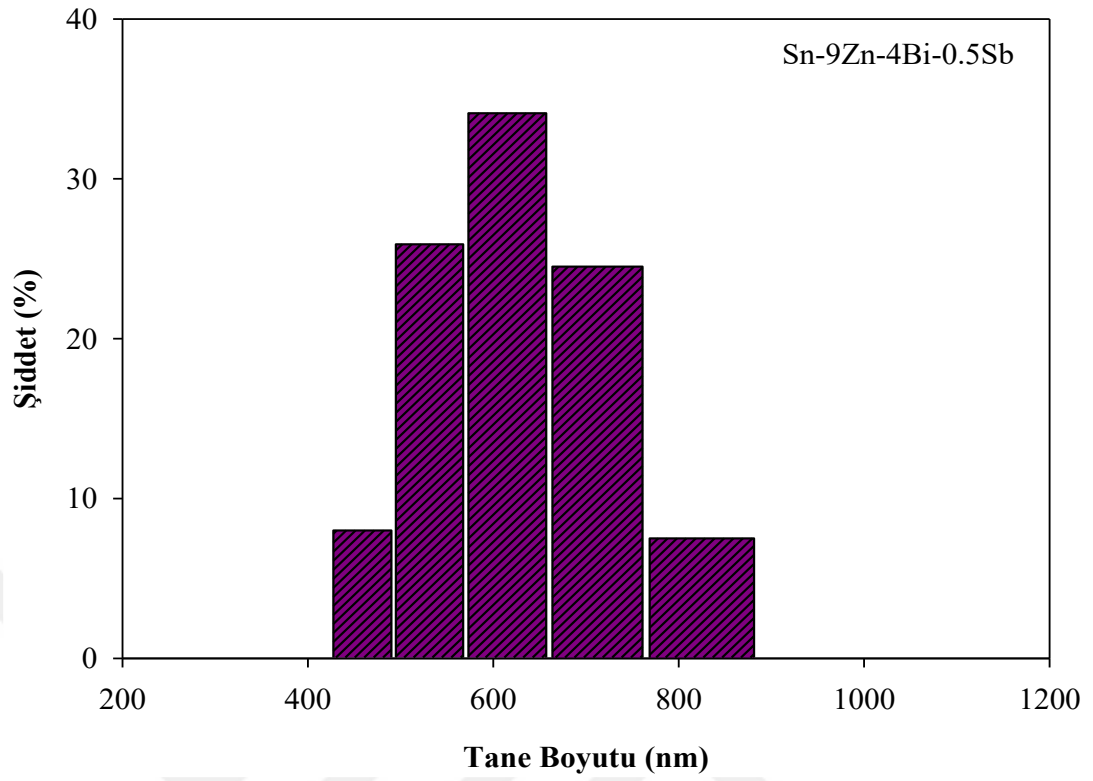
3.7. Alaşımların Parçacık Boyutunun Ölçülmesi

Kriyojenik öğütücüde toz haline getirilen Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb ve Sn-9Zn-4Bi-1Sb lehim alaşımlarının parçacık boyutu Zeta potansiyel ölçüm cihazında tespit edilmiştir. Öncesinde öğütücü de toz haline getirilen numunenin yapısında herhangi bir değişiklik oluşturup oluşturmadığını tespit etmek için XRD analizi yapılmıştır. Şekil 3.33 de sıvı azot ortamında öğütülerek toz haline getirilmiş Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb ve Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımlarının XRD analiz sonuçları verilmiştir.

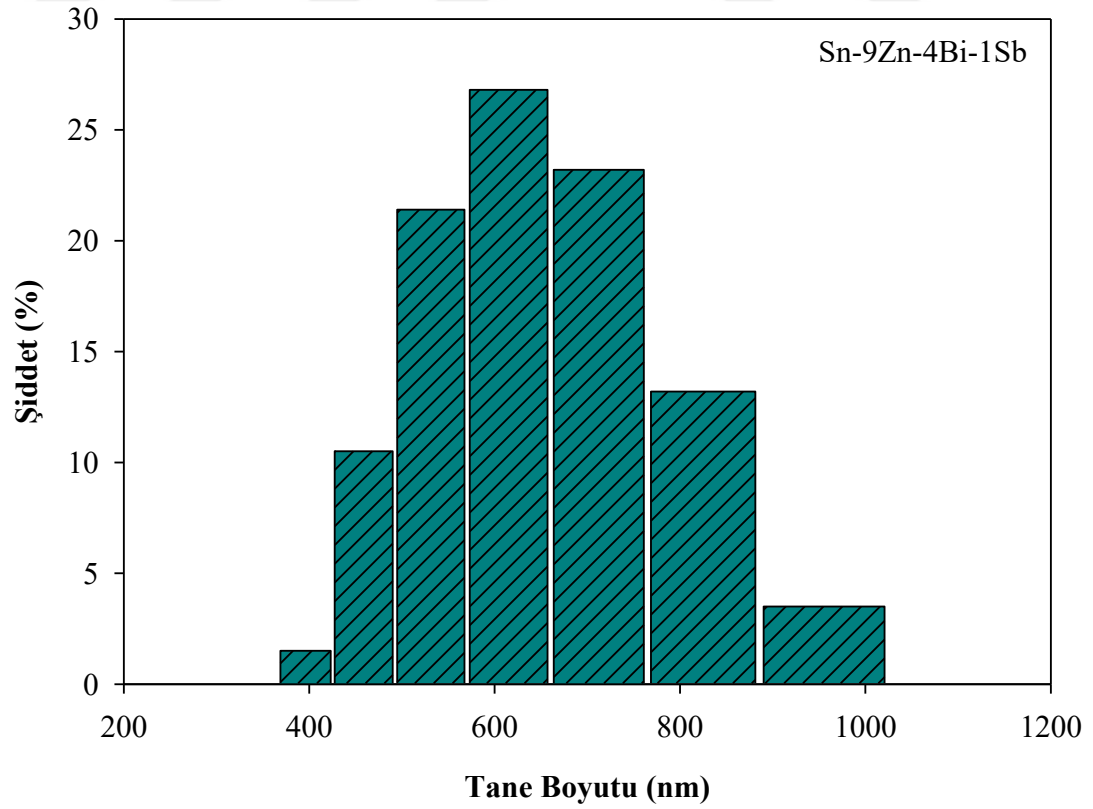


Şekil 3.33. (a) Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb ve (b) Sn-9Zn-4Bi-1Sb toz lehim alaşımlarının XRD sonuçları.

XRD sonuçlarında pikler tetragonal Sn, monoklinik Bi, hegzagonal Zn, kübik α -Sn, monoklinik Sb, ortorombik Zn_4Sb_3 ve ortorombik ZnSb fazlarıyla eşleşmiştir. Toz haline getirilmiş olan numunenin öğütme öncesindeki XRD analiziyle uyum içerisinde olduğu açıktır. Öğütme öncesi ve sonrasına numunede herhangi bir değişiklik meydana gelmediği tespit edildiği için Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımı için XRD analizi yapılmamıştır. Şekil 3.34 ve Şekil 3.35 de toz haline getirilmiş lehim alaşımlarının zetasizer analizinden elde edilen tane boyut analizi yer almaktadır. Toz Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb ve Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımlarının ortalama tanecik boyutları sırasıyla 1172,531 nm (1.17 μ m) ve 783.57 nm (0.78 μ m) olarak bulunmuştur.



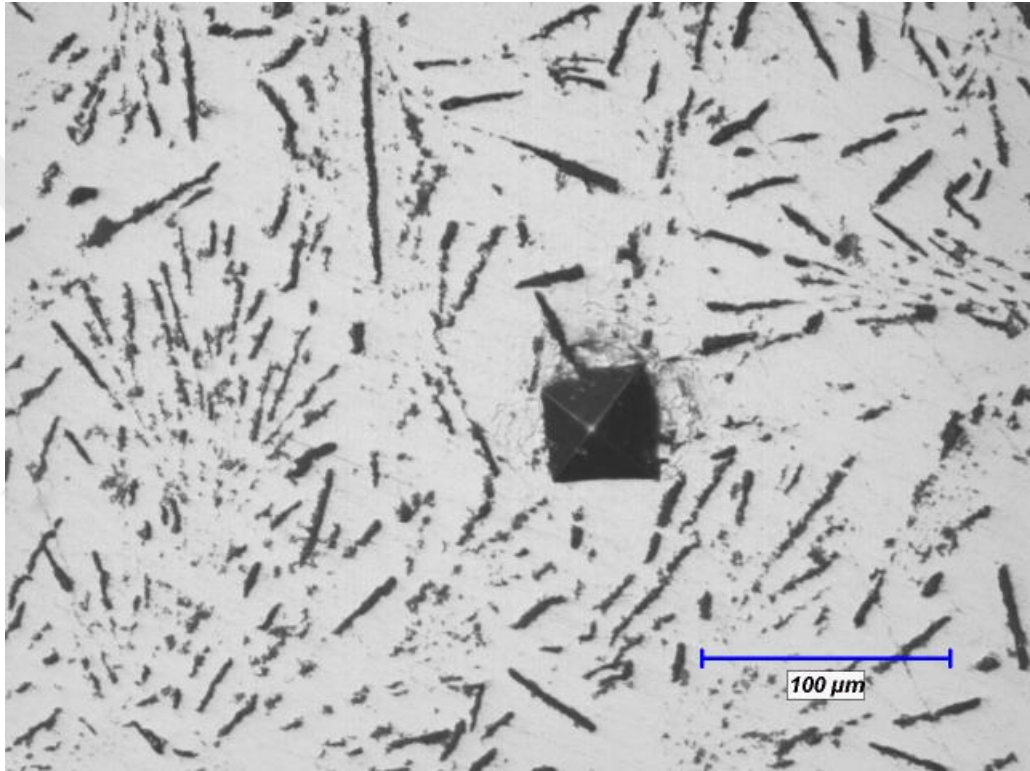
Şekil 3.34. Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb alaşımlarının tane boyutu dağılımı.



Şekil 3.35. Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımlarının tane boyutu dağılımı.

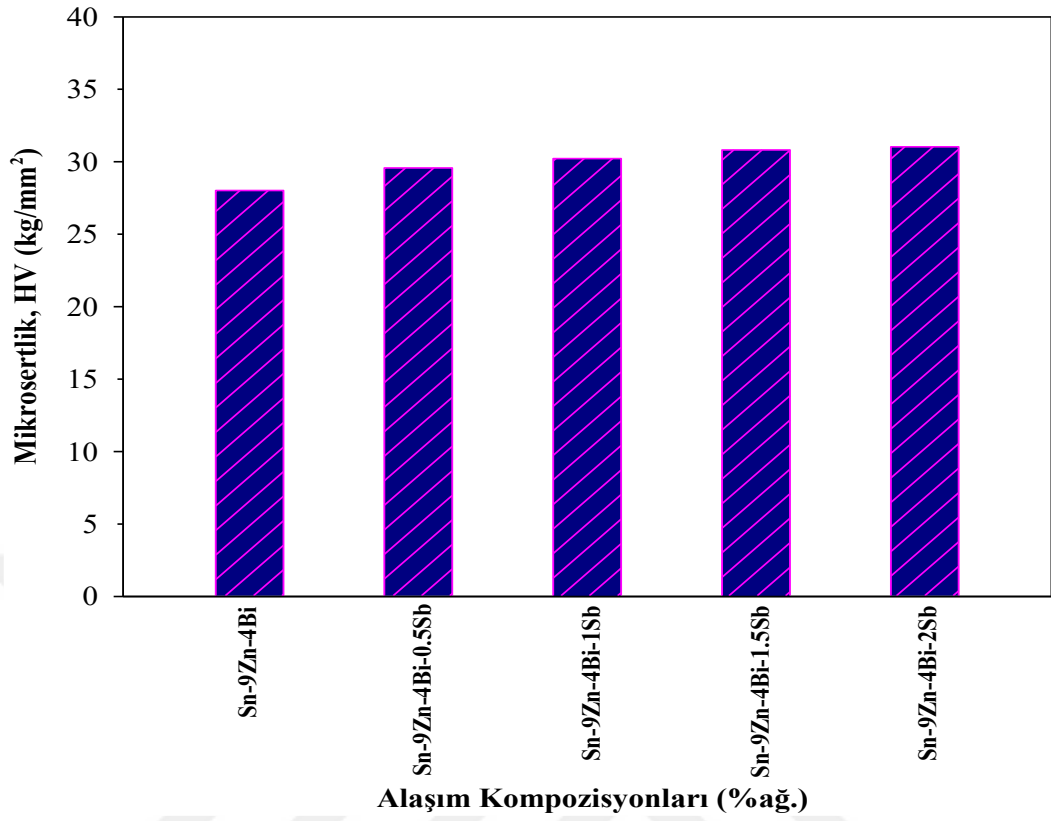
3.8. Alaşımların Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Bu tez çalışmasında mikrosertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçme yöntemi ile yapılmıştır. Alaşımlara 10 s. süreyle 25 g ve 50 g'lık yük uygulanmıştır. 3 mm aralıklarla farklı bölgelerden toplam 20 adet genel sertlik testi alınmıştır. Şekil 3.36 da mikrosertlik izi verilmiştir. Şekil 3.37 ve Şekil 3.38 de alaşımların değişen Sb ve In içeriğine göre mikrosertlik değerleri yer almaktadır.

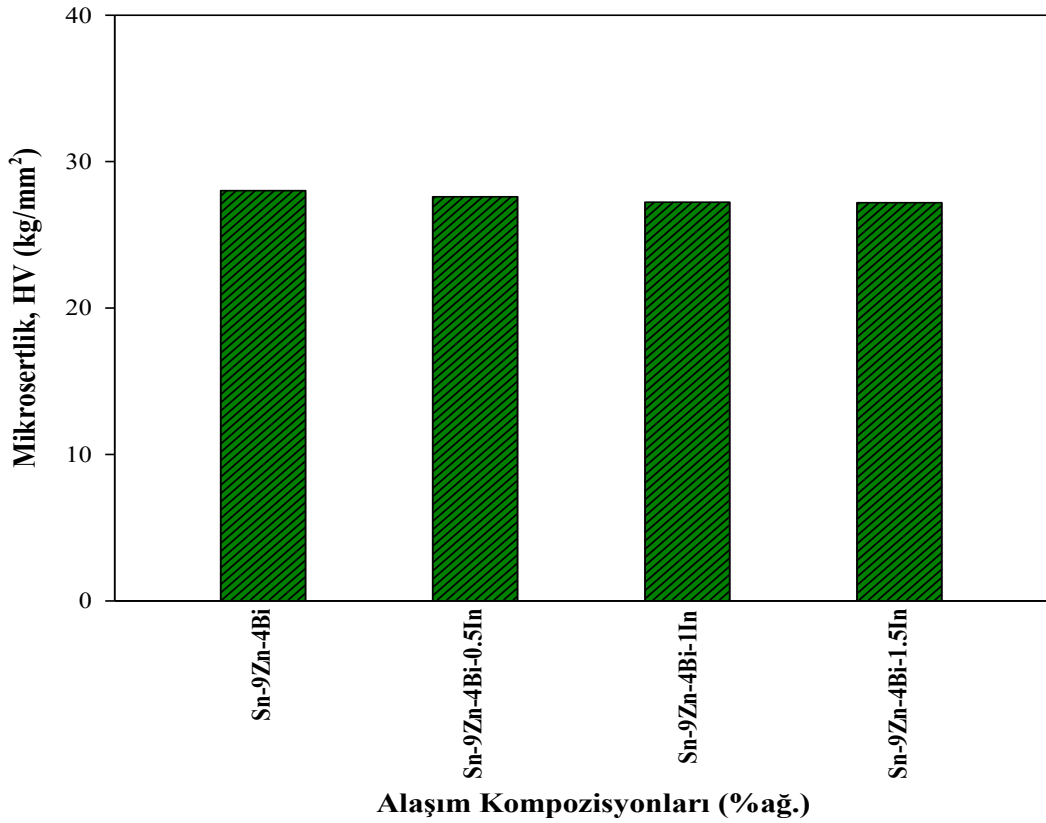


Şekil 3.36. Optik mikroskop yardımıyla çekilen mikrosertlik iz fotoğrafı.

Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının mikrosertlikleri sırasıyla 28.02, 29.57, 30.22, 30.82, 31.04, 27.60, 27.23 ve 27.20 kg/mm²'dir. Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ve In katkısı mikrosertlik değerini önemli ölçüde etkilememiştir. Sb içeriği arttıkça mikrosertlik değerleri artarken In ilavesinin artması ise mikrosertlik değerlerini azaltmıştır.



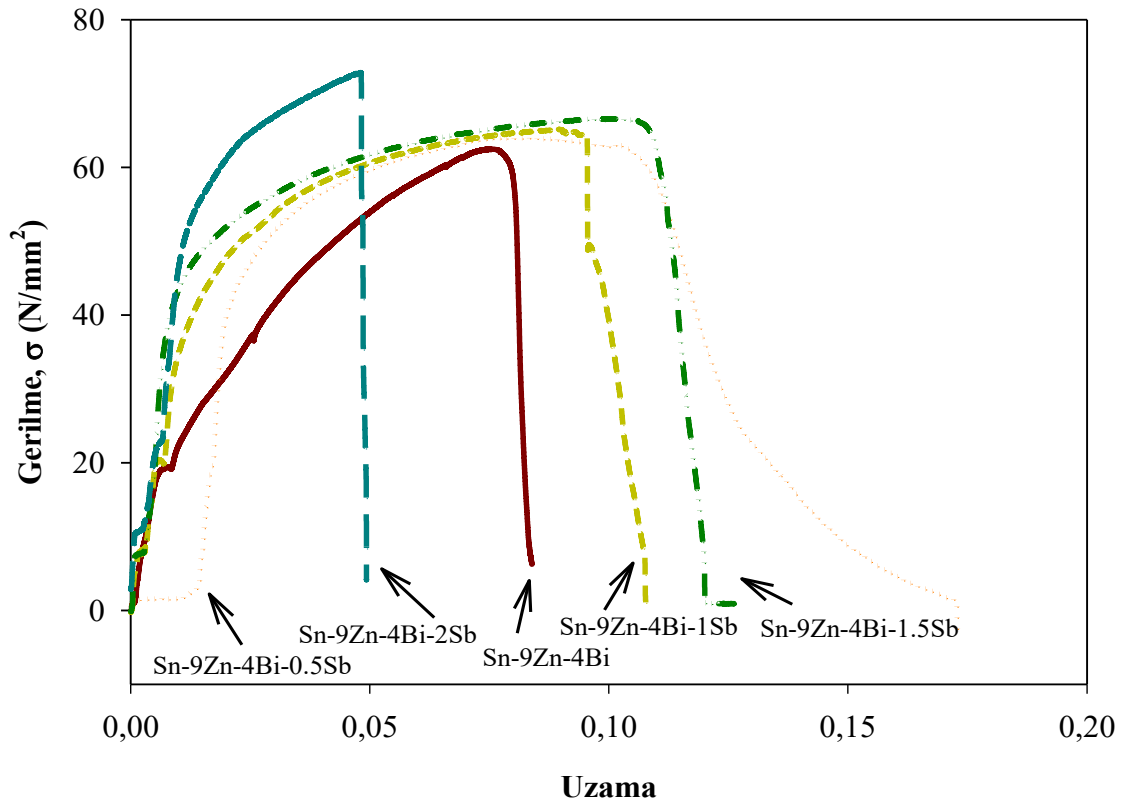
şekil 3.37. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) alaşımlarının mikrosertlik değişimleri.



şekil 3.38. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının mikrosertlik değişimleri.

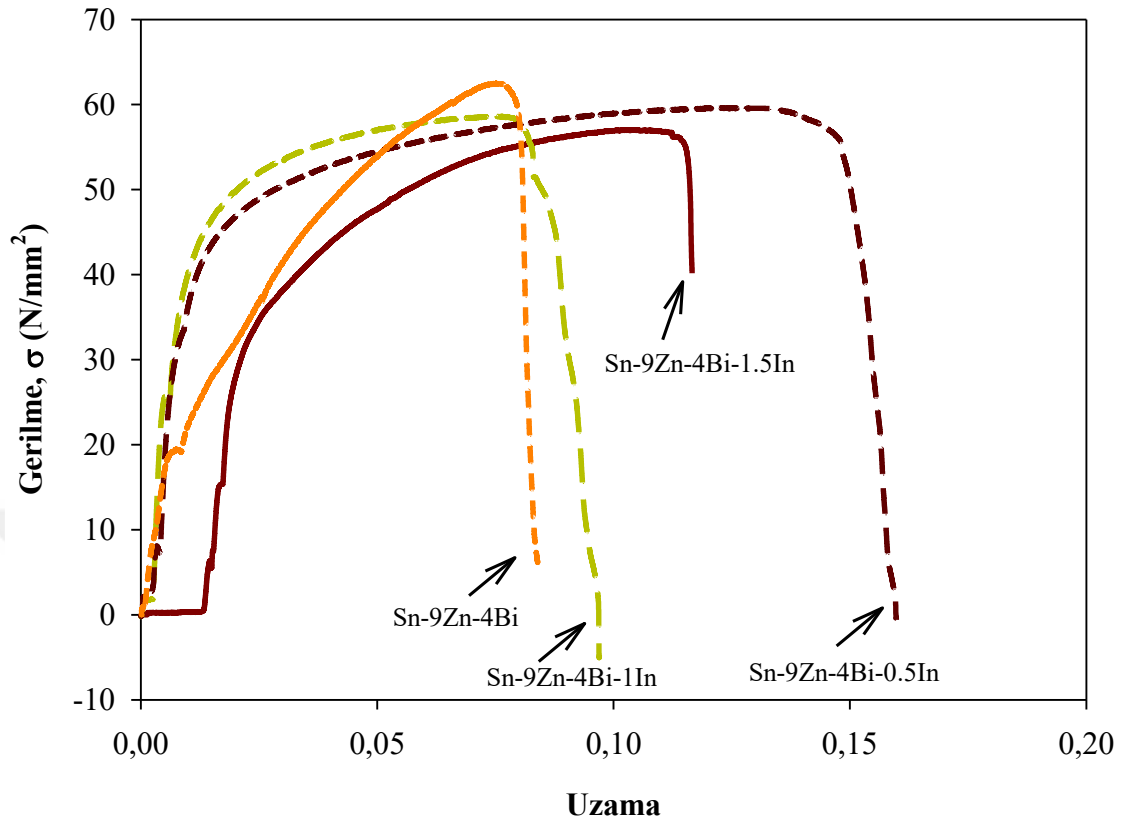
3.9. Alaşımların Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi

Alaşımların çekme-dayanım testleri cihazın alt ve üst çeneler arasına yerleştirildikten sonra 1 mm/dak hızlarında çekilmiştir. Şekil 3.39 ve Şekil 3.40 da değişen Sb ve In içeriğine göre lehim alaşımlarının gerilme-uzama diyagramları yer almaktadır. Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının çekme mukavemetleri 62.50, 64.01, 65.14, 66.58, 72.85, 59.63, 58.64 ve 57.04 N/mm²'dir. Artan Sb ilavesiyle çekme mukavemetinin önemli ölçüde arttığı Şekil 3.39'da açıkça görülmektedir. In ilavesinin ise çekme mukavemetini düşürdüğü açıktır (Şekil 3.40).



Şekil 3.39. Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (x=0, 0.5, 1, 1.5, 2) alaşımlarının gerilme-uzama diyagramı.

Tablo 3.7 de Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In alaşımlarının mikrosertlik ve çekme-dayanım değerleri yer almaktadır.



Şekil 3.40. Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x=0, 0.5, 1, 1.5) alaşımlarının gerilme-uzama diyagramı.

Tablo 3.7. Seçilen kurşunsuz lehim alaşımlarının bazı mekanik özellikleri.

Lehim alaşımları	Mikrosertlik HV (kg/mm ²)	Çekme-Dayanım σ (N/mm ²)	Uzama (%)
Sn-9Zn-4Bi	28.02	62.50	24.46
Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb	29.57	64.01	27.38
Sn-9Zn-4Bi-1Sb	30.22	65.14	31.39
Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb	30.82	66.58	35.09
Sn-9Zn-4Bi-2Sb	31.04	72.85	50.82
Sn-9Zn-4Bi-0.5In	27.60	59.63	42.84
Sn-9Zn-4Bi-1In	27.23	58.64	26.36
Sn-9Zn-4Bi-1.5In	27.20	57.04	36.56

3.10. Maliyet Hesabı

Mikroelektronik endüstri de iyi termal, elektriksel, mekanik özelliklerin yanı sıra aranan önemli bir diğer husus da maliyettir. Endüstri de geçmişten günümüze kadar sürekli olarak daha düşük maliyetle daha yüksek performans aranmıştır. Bu sebeple de zaten Pb içeren alaşımlarının maliyetinin düşük olması onu tercih edilen lehim alaşımı yapmıştır. Pb'nin insana ve çevreye olan ciddi zararları maliyeti diğer kıstaslar arasında alt sıralara ötelemelidir. Saf elementler Euro bazında yurt dışından temin edilmektedir. Alımın gerçekleştiği dönemdeki döviz kuru göz önüne alınarak maliyet hesabı yapılmış ve Türk lirası cinsinden Tablo 3.8 de kaydedilmiştir.

Tablo 3.8. Kg başına lehim alaşımlarının maliyeti.

Lehim alaşımları	Maliyet (₺/kg) (09.09.2020)
Sn-9Zn-4Bi	4.036,96
Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb	4.351,63
Sn-9Zn-4Bi-1Sb	4.664,73
Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb	4.978,11
Sn-9Zn-4Bi-2Sb	5.292,55
Sn-9Zn-4Bi-0.5In	4.452,72
Sn-9Zn-4Bi-1In	4.859,78
Sn-9Zn-4Bi-1.5In	5.290,76

Saf Sb ve In yatakları son derece nadir olması nedeniyle pahalıdır. Bu nedenle lehim alaşımlarının maliyet hesabında Sb ve In katkısı artışa sebep olmuştur.

4. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Pb içeren lehim alaşımlarına alternatif oluşturacak kurşunsuz lehim alaşımları üretilerek, onların termal, elektriksel, yapısal ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bunlar; Sn-9Zn-4Bi, Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-1Sb, Sn-9Zn-4Bi-1.5Sb, Sn-9Zn-4Bi-2Sb, Sn-9Zn-4Bi-0.5In, Sn-9Zn-4Bi-1In ve Sn-9Zn-4Bi-1.5In lehim alaşımlarıdır. Üretilen alaşımların lineer ısı akış sisteminde ısı iletkenlik, dört nokta prob yöntemiyle de elektriksel iletkenlikleri ölçülmüştür. Bununla birlikte mekanik özellikler ve karakterizasyon çalışmaları yapılarak Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ve In katkısının meydana getirdiği değişiklikler literatürle birlikte yorumlanarak tartışılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar ve öneriler başlıklar altında özetlenmiştir.

4.1. Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması

4.1.1. Erime Davranışları ve Termal Özellikler

Mikroelektronik de kullanılan lehim alaşımları için bazı gereksinimler vardır. Genel olarak, lehim alaşımı beklenen ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve mekanik performansları karşılamalıdır. Bunun yanı sıra bir diğer önemli gereksinim ise istenilen erime davranışlarına sahip olmasıdır. Lehim alaşımlarının erime davranışlarının belirlenebildiği en belirgin yöntem DSC analizidir. Alaşımların her birine yapılan termal analiz sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb ($x = 0, 0.5, 1, 1.5, 2$) ve Sn-9Zn-4Bi-[x]In ($x = 0.5, 1, 1.5$) alaşımlarının DSC eğrilerinde keskin bir endotermik tepe noktası gözlenmiştir.
- Lehim alaşımının kimyasal bileşiminin ötektik bileşimden sapması, lehim alaşımının daha geniş bir erime geçiş aralığına sahip olduğu anlamına gelir. Alaşımın daha dar geçiş aralığının olması, lehimlemeyi daha uygun hale getirir. Çünkü bağlantı oluşumu daha hızlı, daha kolay ve daha güvenilir hale gelir. Ticari

alanda yaygın olarak kullanılan Sn-40Pb alaşımasının geçiş aralığı 7.80°C olarak bildirilmiştir [122]. Lehimin hamur kıvamı aralığı sıcaklığı tipik olarak kullanılan lehimin erime noktasının 30°C üzerindedir. Bu nedenle endüstride lehimin maksimum sıvılaşma sıcaklığının 225°C (498 K) ve geçiş aralığının 30°C 'den az olması tavsiye edilmektedir [123]. Tüm bu bilgiler ışığında Tablo 3.1'de alaşımların erime geçiş aralığı karşılaştırıldığında Sn-9Zn-4Bi-1Sb alaşımasının 13.80 K ile en düşük geçiş aralığına sahip olan lehim alaşımı olduğu görülmüştür.

- DSC eğrilerinden elde edilen başka bir özellik, entalpi ve özgül ısıdır. 74.24 J/g entalpi değeri ile en iyi enerji tasarrufu, In oranı ağırlıkça %1 olan lehim alaşımıdır. Özgül ısı değerleri alaşımların DSC eğrilerindeki tepe noktalarından hesaplanmıştır. Buna göre enerji depolama kapasitesi en düşük olan malzeme 0.3559 J/gK değeriyle yine ağırlıkça %1 In içeren alaşımdır. Diğer tüm alaşımlar incelendiğinde entalpi ve özgül ısı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımı için, erime başlangıç sıcaklığı 469.70 K'dan başlamış ve pik sıcaklığı 477.70 K olarak ölçülmüştür. El-Daly ve arkadaşlarının [97] Sn-Zn-Bi alaşımasının termal ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışma da Sn-9Zn-4Bi alaşımasının pik sıcaklığı 467 K olarak bildirilmiştir.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına farklı oranlarda Sb ve In ilavesi ergime noktasını arttırsa da, % ağırlıkça 1.5 In ilavesi ergime noktası en düşük olan lehim alaşımı olmuştur.
- Sb'nin erime noktası yaklaşık 630.6°C 'dir. Ohtani ve arkadaşları [125] yaptıkları çalışmada Sb bazlı alaşımların daha yüksek tepe sıcaklıklarına sahip olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle Sb lehim alaşımlarına katkı olarak tercih edilen bir metal değildir. Alaşımların erime davranışını özetleyen Tablo 3.1 incelendiğinde Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb eklenmesinin erime sıcaklığını arttırdığı görülmüştür. Ayrıca El-Daly ve arkadaşlarının [126, 127] yapmış oldukları başka çalışmalarda Sb metal katkısının termal özellikler üzerindeki benzer etkileri incelenmiştir.
- Çoğu lehim alaşımı için oda sıcaklığında benzeş sıcaklık $0.5 < T_B < 1$ aralığında olmalıdır. Üretilen alaşımların benzeş sıcaklıkları 0.5'ten büyük olarak belirlenmiştir.

4.1.2. Isıl İletkenlik

Isıl iletkenlik, bir malzemenin ısıyı ne kadar iletmediğinin ölçüsüdür. Lehim alaşımlarında elektronik uygulamalarda cihazın güvenilir bir şekilde çalışmaya devam etmesi için bağlantı noktası olarak kullanılan lehimlerin ısıyı sorunsuz iletmesi gerekir. Bu sebeple de lehimlerin ısı iletkenliğinin iyi olması tercih edilir. Bu tez çalışmasında Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (0, 0.5, 1, 1.5, 2) ve Sn-9Zn-4Bi-[x]In (0.5, 1, 1.5) lehim alaşımlarının lineer ısı akış yöntemiyle ısı iletkenlikleri tespit edilmiştir.

- Bütün alaşımlarda ısı iletkenliğin artan sıcaklıkla azaldığı görülmüştür. Artan sıcaklıkla birlikte kafes dislokasyonu artar, elektron ve fononların hareketi engellenir ve elektronların yanı sıra fononların saçılmasını artırır. Ayrıca sıcaklık arttıkça kafesin titreşimleri daha yoğun hale gelir. Bu nedenle, hem elektronların hem de fononların serbest hareketini güçlü bir şekilde engelleyen çarpışmalar, elektron-fonon ve fonon-fonon etkileşimleri olasılığı artar. Böylece, elektronların ve fononların ortalama serbest yolu azalır. Dolayısıyla alaşımların ısı iletkenliği azalır [128].
- Alaşımların ısı iletkenlik çizgileri saf metaller arasında uzanmış ve Sn'ye yakın olduğu görülmüştür. Sistemlerdeki Sb miktarı arttıkça ölçülen ısı iletkenlik değerleri saf Sb'nin ısı iletkenlik çizgisine yaklaşmıştır. Sn-Zn-Bi alaşım sistemine In ilavesi ile alaşımlar saf Sn ve Bi eğrileri arasında kalmıştır. Sn-9Zn-4Bi alaşımına In ilavesinin artışıyla ısı iletkenlik değerleri saf In değerine yaklaşmıştır.
- Tablo 3.4 de üretilen lehim alaşımlarının erime sıcaklığındaki ısı iletkenlik verilerine göre en yüksek ısı iletkenliğine sahip olan alaşım Sn-9Zn-4Bi-0.5In alaşımıdır. Bu lehim alaşımının erime sıcaklığındaki ısı iletkenliği 40.3 ± 3.63 W/mK olarak ölçülmüştür. Farklı kompozisyonlarda Sn-Pb alaşımları için Ocak ve diğerleri tarafından bildirilen çalışmada [129] Sn-40Pb lehim alaşımının ısı iletkenliği 53.5 W/mK olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla kurşun içeren lehim alaşımına ısı iletkenlik değeri göz önüne alındığında alternatif oluşturabilecek alaşım Sn-9Zn-4Bi-0.5In lehim alaşımı olabilir.
- Sn esaslı lehim alaşımlarının ısı iletkenliğinin çalışıldığı başka bir çalışmada [130] Sn-9Zn-4Bi-2In alaşımının erime sıcaklığındaki ısı iletkenliği 43.55 W/mK

olarak ölçülmüştür. In miktarı arttıkça ısı iletkenliğin arttığı söylenebilir. Ancak bu artışı ın ne ölçüde devam edeceği araştırılmalıdır.

- Sn-9Zn-4Bi alaşı ına Sb ve In ilavesi ısı iletkenliğini artırmıştır. Fakat kendi arasında Sb içeriğinin ve In içeriğinin artışıyla ısı iletkenlik değerleri azalmıştır.

4.1.3. Elektriksel İletkenlik

Mikroelektronik cihazlar çalışırken, eklem yeri olarak kullanılan lehim aynı zamanda bir elektriksel ara bağlantı görevi görmektedir. Yani devreye giren ve çıkan tüm elektrik akımları lehim bağlantısından da kusursuz bir şekilde geçmelidir. Lehimin elektriksel bağlantı noktası olarak yeteri kadar işlev görebilmesi, o lehimin elektriksel iletkenliğinin iyi olduğunu gösterir.

- Bu tez çalışmasında üretilen lehim alaşımlarının elektriksel iletkenliği artan sıcaklıkla azalmıştır. Dislokasyonlar, elektriksel iletkenlikte ve ısı iletkenlikte azalmaya neden olur. Ayrıca safsızlıklar, ısıtma işleminin boyutu, deformasyonlar, sıcaklık ve kimyasal bileşim de elektriksel iletkenliği etkiler.
- Alaşımların elektriksel iletkenlik çizgileri saf metaller arasında uzanmış ve Sn'ye yakın olduğu görülmüştür. Sistemlerdeki Sb miktarı arttıkça ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri saf Sb'nin elektriksel iletkenlik çizgisine yaklaşmıştır. Aynı şekilde In miktarı arttıkça elektriksel iletkenlik değerleri saf In eğrisine doğru uzanmıştır.
- Sn-9Zn-4Bi alaşı ına In ilavesi elektriksel iletkenliğini artırmıştır. Isı iletkenlik değerlerinde olduğu gibi elektriksel iletkenlik değerleri de In ilavesiyle artış göstermiştir.
- Tablo 3.4 de üretilen lehim alaşımlarının erime sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik verilerine göre en yüksek elektriksel iletkenliğine sahip olan alaşı m Sn-9Zn-4Bi-1In alaşı mıdır. Bu lehim alaşı mının erime sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği $0.038 \times 10^8 / \Omega m$ olarak ölçülmüştür. Farklı kompozisyonlarda Sn-Pb alaşımları için Ocak ve diğerleri tarafından bildirilen çalışmada [129] Sn-40Pb lehim alaşı mının elektriksel iletkenliği $0.044 \times 10^8 / \Omega m$ olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla kurşun içeren lehim alaşı mına elektriksel iletkenlik değeri göz önüne alındığında alternatif oluşturabilecek alaşı m Sn-9Zn-4Bi-1In lehim alaşı mı olabilir.

- Sn esaslı lehim alaşımlarının elektriksel iletkenliğinin çalışıldığı başka bir çalışmada [130] Sn-9Zn-4Bi-2In alaşımının erime sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği $0.044 \times 10^8 / \Omega \text{m}$ olarak ölçülmüştür.
- In miktarı arttıkça elektriksel iletkenlik artış göstermiştir. Ancak bu artışın In oranının ilavesiyle nereye kadar devam edeceği araştırılmalıdır.
- Daha yüksek elektriksel iletkenliği, Sb ve In ilavesiyle alaşımlarda daha serbest hareket eden elektrik yükü taşıyıcılarının olduğunu göstermiştir. Serbest hareket eden elektrik yükü taşıyıcıları, alaşımların ısı iletkenliğini iyileştirmede de etkilidir.

4.1.4. Isıl İletkenliğe Elektron ve Fonon Katkısı

Saf metallerde ısı iletimi serbest elektronlar tarafından sağlanırken, alaşımlarda hem elektronlar hem de fononlar tarafından sağlanır. Isıl iletkenliğine elektronların ve fononların katkısı belirlenebilir. K_{toplam} , lineer ısı akış sisteminden elde edilen ısı iletkenliktir ve σ , dört nokta prob yönteminden elde edilen elektriksel iletkenliktir. Wiedemann-Franz yasası ile ilgili sıcaklıkta ısı iletkenliğe elektron katkısını veren K_{elektron} hesaplanmıştır. Isıl iletkenliğe fononların katkısı ise K_{toplam} ve K_{elektron} arasındaki fark alınarak her bir sıcaklık için bulunmuştur.

- Isıl iletkenliğe fonon katkısı artan sıcaklıkla doğrusal olarak azalırken, elektron katkısında keskin bir artış gözlenmemiştir. Elektron ortalama serbest yolu saf metallerde daha uzun olduğundan, K_{elektron} değeri tüm sıcaklıklarda ısı iletkenliğe hakim olmuştur. Bununla birlikte, saf olmayan malzemelerde K_{fonon} , safsızlıklarla çarpışarak ortalama serbest yolu azaltarak K_{elektron} 'a yaklaşmıştır.
- Wiedemann-Franz yasasına göre K_{elektron} , elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla çarpımı ile doğru orantılıdır. K_{elektron} genellikle elektriksel iletkenlikle paralellik gösterir (Wiedemann Franz yasası). Bu nedenle K_{elektron} ve K_{fonon} 'un önemi K_{elektron} 'un boyutuna bağlıdır.
- Yüksek saflıkta olan metallerde, elektronların ısı iletkenliğe katkısı fononlardan daha fazladır. Metallerde, ısı iletimini sağlayan serbest elektron sayısı ne kadar fazlaysa, fononlara göre elektronların saçılması daha az ve daha hızlıysa ısı iletkenlik artar.

4.1.5. Mikroyapı

Ötektik lehimlerin hacimsel oranı, dağılımı ve her fazın boyutu veya aralığı gibi mikroyapısal özellikleri, bir lehim bağlantısının termal, elektriksel ve mekanik özelliklerini belirler. Üretilen lehim alaşımlarının mikroyapıları SEM analizi ile incelenmiş, her bir fazın kimyasal bileşimi EDX analizi ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- Sn-9Zn-4Bi-[x]Sb (0, 0.5, 1, 1.5, 2) ve Sn-9Zn-4Bi-[x]In (0.5, 1, 1.5) alaşımlarının mikroyapısı incelenmiş ve her birinde üç faz gözlenmiştir. Bu fazlar, Sn bakımından zengin ana faz; gri renk, Zn bakımından zengin olan faz; siyah iğne şeklinde olan parçacıklar ve ağırlıkça oranı Bi bakımından zengin olan faz; beyaz yuvarlak şekilli parçacıklar olarak ifade edilmiştir.
- Fazlar alaşımlar içinde rastgele dağılmıştır.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ve In ilavesi fazlar içerisinde küçük oranlarda da olsa mevcut olduğu EDX sonuçlarından görülmüştür. Fakat ayrı bir faz olarak gözlenmemişlerdir.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımında hem küçük hem de büyük Zn çubukları gözlenmiştir. Sb ilavesiyle uzun çubuk şeklindeki Zn fazının daha kısa ve ince çubuklara dönüşmüştür.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına In eklenerek, mikroyapı rafine edilmiş, özellikle Zn bakımından zengin çökelti daha düzgün dağılmıştır. Düzensiz bölgelerin artan In içeriği ile azalma eğiliminde olması, Sn-9Zn-4Bi-[x]In (x= 0.5, 1, 1.5)lehim alaşımlarının mikroyapısını daha düzgün hale getirmiştir.

4.1.6. XRD

Üretilen lehim alaşımlarının kristal yapıları XRD analizi ile incelenmiş olup fazların; kristal sistemi, kafes parametreleri, Miller indisleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiş ve yorumlanmıştır.

- Sn-9Zn-4Bi lehim alaşımında yüksek şiddette Sn fazı, orta şiddette Zn ve Bi fazları gözlenmiştir.
- Sn-9Zn-4Bi lehim alaşımına Sb katkısıyla XRD desenlerindeki ana pikler, artan Sb içeriği ile daha keskin ve daha dar hale gelmiştir.

- Sb ilavesinin olduğu XRD desenlerinde düşük şiddetlerde ZnSb , Zn_4Sb_3 ve $\text{Sb}_{28.02}\text{Zn}_{37.98}$ intermetalik bileşikleri gözlenmiştir. Ancak mikroskopik incelemede bu bileşikler gözlenmemiştir. Bu durum muhtemelen bu intermetalik bileşiklerin dağılımından ve çok küçük boyutlarından kaynaklanmaktadır.
- Sn-9Zn-4Bi lehim alaşımına In katkısıyla XRD desenlerindeki ana pikler, artan In içeriği ile daha keskin ve daha dar hale gelmiştir.
- In ilavesinin olduğu XRD desenlerinde düşük şiddetlerde BiIn ve Bi_3In_5 intermetalik bileşikleri gözlenmiştir. SEM-EDX incelemesinde bu bileşiklere rastlanmamıştır. Mikroyapı içerisindeki intermetalik bileşiklerin dağılımından ve çok küçük boyutlarda olmasından dolayı SEM analizinde gözlenemediği düşünülmektedir.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ve In ilavesi Sn fazının c/a oranını yaklaşık %0.037 artırmıştır.
- XRD analizinden elde edilen verilerle hesaplanan c/a değeri mekanik özellikleri de etkiler. Elastik modülü bir malzemenin atomlar arası kuvvetlerine bağlı olduğundan [132], alaşım elementlerinin c/a oranına %0.037 oranında etkisinden dolayı, lehim alaşımlarına Sb ilavesiyle çekme-dayanım ve mikrosertlik deneylerinde artış kısmının bu konuyla ilgili olabileceği söylenebilir. Atomlar arasındaki mesafenin c/a değeri değişir ve bunun sonucunda aralarındaki karşılıklı kuvvet de etkilenir.

4.1.7. Tane Boyutu

Lehim alaşımları öğütme işlemi sonrasında toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilmiş olan Sn-9Zn-4Bi-0.5Sb ve Sn-9Zn-4Bi-1Sb lehim alaşımlarının tanecik boyut analizi yapılmıştır.

- Tozların tanecik boyutu nano mertebesinde elde edilmiştir.
- Öğütme işleminde devir sayısı arttıkça tane boyutu azalmıştır.
- Öğütme sonrasında XRD analizi yapılmış ve lehim alaşımı içerisinde farklı herhangi bir bileşiğe rastlanmamıştır.
- Lehim teli yerine parçacık hale getirilen lehim tozları mikroelektronik devrelerde kullanım kolaylığı yaratacaktır.

- Kalan diğer lehim alaşımlarının toz haline getirilip tanecik boyut analizi deneysel aksaklıklar nedeniyle yapılamamıştır. Öğütme işlemi her bir alaşım için farklı devir sayılarında yapılabilir. Böylece farklı boyutlarda toz lehim alaşımları üretilebilir.

4.1.8. Mikrosertlik

Lehim alaşımlarının sertliği, bağlantının sağlamlığı, kalitesi, dayanıklılığı ve kolay uygulanabilirliği bakımından önemlidir. Bir elektronik cihaz çalışırken, lehim bağlantıları mekanik baskılara ve gerilmelere maruz kalabilir. Bu nedenle mikrosertlik, çekme-dayanım gibi mekanik özelliklerin belirlenmesi gereklidir.

- Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ilavesi sertliği artırsa da önemli ölçüde bir iyileştirme gözlenmemiştir.
- En yüksek mikrosertliğe sahip olan lehim alaşımı ağırlıkça %2 oranında Sb ilavesi olan alaşımdır.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına ağırlıkça %2 oranında Sb ilavesiyle mikrosertlik değeri %9.73 oranında artış göstermiştir.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına In ilavesiyle mikrosertlik değeri azalmıştır.

4.1.9. Çekme-Dayanım

Lehim alaşımları; elektronik, otomotiv, havacılık ve diğer endüstrilerde sıklıkla kullanılan malzemedir. Bu sebeple çekme-dayanımı, malzemelerin güvenilirliği ve performansı açısından çok önemlidir.

- Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ilavesi çekme-dayanımını önemli ölçüde artırmıştır.
- En yüksek çekme-dayanımına sahip olan lehim alaşımı ağırlıkça %2 oranında Sb ilavesi olan alaşımdır.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına ağırlıkça %2 oranında Sb ilavesiyle çekme- dayanım değeri %14.21 oranında artış göstermiştir.
- Sn-9Zn-4Bi-2Sb alaşımının çekme-dayanımı 72.85 N/mm^2 olup, bu değer Sn-37Pb ötektik alaşımının 55 N/mm^2 [132] olan çekme-dayanım değerinden %24.50 daha yüksektir.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına Sb ilavesiyle lehim alaşımlarının uzama oranı artmıştır.

- Sn-9Zn-4Bi alaşımına In ilavesiyle çekme-dayanım değeri azalmıştır.
- Sn-9Zn-4Bi alaşımına In ilavesiyle gerinim oranları azalmış ve uzama değeri tutarsız davranışlar sergilemiştir.



KAYNAKÇA

1. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. Web sayfası: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0095&qid=1575306757180>, (Erişim tarihi: Kasım, 2022).
2. Abtewa, M., Selvaduray, G., 2000. Lead-free Solders in Microelectronics. **Materials Science and Engineering**, **27** (5-6): 95-141.
3. Anderson I. E., Terpstra R. L., 2001. Lead-free solder, US Patent No. US6231691B1.
4. Suganuma, K., Kim, K.S., 2006. Sn–Zn low temperature solder. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, **18** (1): 121-127.
5. Liu, J.C., Park, S., Nagao, S., Nogi, M., Koga, H., Ma, J.S., Zhang, G., Suganuma, K., 2015. The role of Zn precipitates and Cl⁻ anions in pitting corrosion of Sn–Zn solder alloys. **Corros. Sci.**, **92**: 263-271.
6. Lim, R., 2010. Investigation into lead-free solder in Australian defense force applications. Air Vehicles Division Defence Science and Technology Organization. DSTO-TN-0970, 47 s.
7. Kotadia, H.R., Howes, P.D., Mannan, S.H., 2014. A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders. **Microelectron. Reliab.**, **54** (6): 1253-1273.
8. Pandher, R., Healey, R., 2008. Reliability of Pb-Free solder alloys in demanding BGA and CSP applications, 2018-2023. *Proceedings of the 58th Electronic Components and Technology Conference*.
9. Pandher, R., Lewis, B., Vangaveti, R., Singh, B., 2007. Drop shock reliability of lead-free alloys effect of micro-additives, 669-676. *Proceedings of the 57th Electronic Components and Packaging Conference*.

10. Huang, M.L., Wang, L., 2005. Effects of Cu, Bi, and In on microstructure and tensile properties of Sn-Ag-x(Cu, Bi, In) solders. **Metall. Mater. Trans. A**, **36** (6): 1439-1446.
11. Liu, P.L., Shang, J.K., 2001. Interfacial segregation of bismuth in copper/tin-bismuth solder interconnect. **Scr. Mater.**, **44** (7): 1019-1023.
12. Zhao, J., Qi, L., Wang, X., Wang, L., 2004. Influence of Bi on microstructures evolution and mechanical properties in Sn–Ag–Cu lead-free solder. **J. Alloys Compd.**, **375** (1): 196-201.
13. Ren, G., Wilding, I.J., Collins, M.N., 2016. Alloying influences on low melt temperature SnZn and SnBi solder alloys for electronic interconnections. **J. Alloys Compd.**, **665**: 251-260.
14. Islam, M.N., Chan, Y.C., Rizvi, M.J., Jillek, W., 2005. Investigations of interfacial reactions of Sn–Zn based and Sn–Ag–Cu lead-free solder alloys as replacement for Sn–Pb solder. **Journal of Alloys and Compounds**, **400** (1-2): 136-144.
15. Saatçi, B., Maraşlı, N., Gündüz, M., 2007. Thermal conductivities of solid and liquid phases in Pb-Cd and Sn-Zn binary eutectic alloys. **Thermochimica Acta**, **454** (2): 128-134.
16. Chen, C.M., Hung, Y.M., Lin, C.P., Su, W.C., 2009. Effect of temperature on microstructural changes of the Sn–9 wt.% Zn lead-free solder stripe under current stressing. **Mater. Chem. Phys.**, **115**: 367-370.
17. Hummel, R., 2011. Electronic Properties of Materials, 4th Ed., Springer, 488 s.
18. Karaoğlu, B., 2020. Temperature and heat, 199-215. *In*: Classic Physics. Springer.
19. Theodore L., 2011. Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer, Wiley, New Jersey, 664 s.
20. Baukal C. E., 1998. Oxygen-Enhanced Combustion, CLC Press, 384 s.

21. Perry, R. H., and Green, D., 1997. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7 th edition, McGraw-Hill, 2274 s.
22. Shrivastava, A., 2018. Introduction to Plastics Engineering, 1st Edition, Plastics Design Library, 262 s.
23. Sheng, J. J., 2013. Steam flooding, 361-388. *In: Enhanced Oil Recovery Field Case Studies*. Gulf Professional Publishing.
24. Gale, W. F., Totemeier, T. C., 2004. Smithells Metals Reference Book (Eighth Edition). Elsevier, 1856 s.
25. Kittel, C., 2005. Introduction to Solid State Physics Eighth edition. John Wiley & Sons, Inc, 680 s.
26. Hoffman, P., 2008. Solid State Physics. Wiley, Weinbeim, 248 s.
27. Aydoğan, Ş., 2014. Katılmal fiziği. Nobel, Ankara, 615 s.
28. Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y. and Klemens, P. G., 1970. Thermal Conductivity Metallic Elements and Alloys. New York-Washington, 1445 s.
29. Callister, W.D. Jr., Rethwisch, D. G., 2015. Malzeme Bilimi ve Mühendsiliği. Kenan Genel 8. Basımdan çeviri, Nobel Yayın, Ankara, 968 s.
30. Ata, P., 2015. Lineer Isı Akış Metoduyla In-Bi İntermetalik Alaşımlarının Isıl İletkenlik Katsayısının Ölçümü. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, 102 s.
31. Platunov, E. S., 1964. Measurement of heat capacity and heat conductivity of rod subjected to monotonic heating and cooling. **High Temperature (USSR)**, 2 (3): 346-350.
32. Taylor, R. E., Powell, R. W., Nalbantyan, M., and Davis, F., 1968. Evaluation of

direct electrical heating methods for the determination of thermal conductivity at elevated temperatures, 1-74. Air Force Materials Laboratory Techn. Rept. AFML-TR68-227.

33. Berget, A., 1887. Measurement of the thermal conductivity of mercury, of Its Absolute Value. **Compt. Rend.**, **105**: 224-227.
34. Berget. A., 1888. Thermal conductivity of mercury and certain metals. **J. Phys. Theor. Appl.**, **7**: 503-518.
35. Laubitz, M. J., 1969. Chapter 3, 111-183, *In*: Measurement of the Thermal Conductivity of Solids at High Temperatures by Using Steady-State Linear and Quasi-Linear Heat Flow in Thermal Conductivity (Eds: R. P. Type). Academic Press, London.
36. Flynn, D. R., 1969. Mechanical and thermal properties of ceramics, 63-123. *In*: Thermal conductivity of Ceramics (Eds: J. B. Wachtman). NBS Spec. Publ.
37. Bauerle, J. E., 1961. Thermoelectricity: science and engineering, 285-311. *In*: Thermal Conductivity (Eds: R.R. Heikes, R.W. Ure). Interscience Publishers, New York.
38. Honda, K. and Simidu, T., 1917. On the thermal and electrical conductivities of carbon steels at high temperatures. **Sci. Repts. Tohoku Univ.**, **6**: 219-233.
39. Schofield, F. H., 1925. The thermal and electrical conductivities of some pure metals. **Proc. Roy. Soc. Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, **A107**: 206-227.
40. Powell, R. W., 1934. The thermal and electrical conductivities of metals and alloys. **Proc. Phys. Sac.**, **46** (5): 659-678.
41. Goldsmith, H. J., 1956. The thermal conductivity of bismuth telluride. **Proc. Phys. Soc. (London)**, **B69**: 203-2099.
42. ASTM Standards, 1967. Standard method of test for thermal conductivity of

materials by means of the guarded hot plate, ASTM Designation: C177-63, part 14, *In: Book of ASTM Standards*. Philadelphia.

43. Poensgen, R., A, 1912. Technical method for investigating the thermal conductivity of slabs of material. **VDI Zeitschrift**, **56** (41): 1653-1658.
44. Jakob, M., 1922. Measurement of the thermal conductivity of liquids, insulating materials and metals. **VDI Zeitschrift**, **66**: 688-693.
45. ASTM Standards, 1967. Standard method of test for thermal conductivity of refractories, ASTM Designation: C201-47 (1958), part 13, 170-177. *In: Book of ASTM Standards*. Philadelphia.
46. Wilkers, G. B., 1946. Thermal conductivity , expansion, and specific heat of insulators at extremely low temperatures. **Refrif. Eng.**, **52** (1): 37-42.
47. Schröder, J.,A, 1959. Simple method of determining the thermal conductivity of solids. **Philips Tech. Rev.**, **21**(12): 357-361.
48. Schröder, J., 1963. Apparatus for determining the thermal conductivity of solids in the temperature range from 20 to 200 C. **Rev. Sci. Instr.**, **34** (6): 615-621.
49. ASTM Standards, 1967. Tentative method of test for thermal conductivity of insulating materials at low temperatures by means of the wilkes calorimeter, ASTM Designation: C420-62T, part 14, 172-179. *In: Book of ASTM Standards*.
50. ASTM Standards, 1967. Standard method of test for thermal conductivity of materials by means of the heat flow meter, ASTM Designation: C518-67, part 14, 230-238. *In: Book of ASTM Standards*.
51. Ingen-Hausz, J., 1789. On Metals as Conductors of Heat, *J. de Physique*, 1789.
52. Lodge, O. J., 1878. On a method of measuring the absolute thermal conductivity of crystals and other rare substances, part I. *Phil. Mag.*, **5**, 110 s.

53. Berget, A., 1888. Measurement of the coefficients of thermal conductivity of metals. **Compt. Rend.**, **107**: 227-229.
54. Lees, C. H., 1892. On The Thermal Conductivities of Crystals And Other Bad Conductors A183. Phil. Trans. Roy. Soc., London.
55. Dusen, M. S., Shelton, S. M., 1934. Apparatus for measuring thermal conductivity of metals up to 600 C. **J. Res. Natl. Bur. Stand.**, **12**: 429-40.
56. Powell, R. W., 1937. The Thermal and Electrical Conductivity of a Sample of Acheson Graphite from 0 to 800 C. **Proc. Phys. Soc. (London)**, **49**: 419-25.
57. Francel, J., Kingery, W. D., 1954. Apparatus for determining thermal conductivity by a comparative method. **J. Am. Ceram. Soc.**, **37**: 80-84.
58. Stuckes, A. D., Chasmar, R. P., 1956. Measurement of the thermal conductivity of semiconductors. **Rept. Meeting of Semiconductors (Phys. Soc., London)**: 119-225.
59. ASTM Standards, 1967. Standard method of test for thermal conductivity on whiteware ceramics, ASTM Designation: C408-58, part 13, 348-352. *In*: Book of ASTM Standards.
60. Mirkovich, V. V., 1965. Comparative method and choice of standards for thermal conductivity determinations. **J. Am. Ceram. Soc.**, **48** (8): 387-391.
61. Christiansen, C., 1881. Some experiments on heat conduction. **Ann. Physik**, **3** (14): 23-33.
62. Peirce, B. O., Wilson, R. W., 1898. On the thermal conductivities of certain poor conductors. **Proc. Am. Acad. Arts and Sci.**, **34** (1): 1-56.
63. Sieg, L. P., 1915. An attempt to detect a change in the heat conductivity of a selenium crystal with a change in illumination. **Phys. Rev.**, **6**: 213-218.
64. Powell, R. W., 1936. Some Heat –Resistant Alloys from 0 to 800 C, 381-92. *In*: The Thermal and Electrical Conductivities of Metals and Alloys. S, Proc.

Phys. Soc. (London).

65. Powell, R. W., Hickman, M. J., 1939. Thermal conductivity and electrical resistivity, 242-251. *In: The Physical Properties of a Series of Steels*. Iron and Steel Institute, Special Report No. 24.
66. Powell, R. W., Tye, R. P., 1960. The thermal and electrical conductivities of some nickel-chromium (nimonic) alloys, **The Engineer**, **209**: 729-32.
67. Heaney, M. B., 2003. Electrical conductivity and resistivity, 7-1. *In: Electrical Measurement, Signal Processing and Displays* (Eds: J. G. Webster). CRC Press.
68. Onaran, K., 2000. Malzeme Bilimi, 8. Baskı. Bilim Teknik Yayınevi, 383 s.
69. Devanathan, V., 2021. The Wiedemann-Franz law for electrical and thermal conduction in metals. **Journal of Chennai Academy of Sciences**, **4**: 1-26.
70. Uzun, H., 2012. Mühendisler için Malzeme Biliminin Temel İlkeleri. Değişim Yayınları, 605 s.
71. Savaşkan, T., 2018. Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi. Papatya Yayıncılık, 444 s.
72. Weissbach, W., 1993. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Anık, S., Anık, E., Vural, M., çeviri Birsen Kitapevi, İstanbul, 348 s.
73. Colling, D.A., 1995. Industrial Materials. Prentice - Hall Inc., Ohio, 352 s.
74. Brookes, C. A., 1970. Plastic deformation and anisotropy in the hardness of diamond. **Nature**, **228**: 660-661.
75. Knoop, F., Peters, C.C., Emerson, W.B., 1939. A Sensitive Pyramidal. Diamond Tool for Indentation Measurements. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 848 s.

76. Yıldız A., Genç, Ö. ve Bektaş, S., 1997. Enstrümental Analiz Yöntemleri. Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara, 506 s.
77. Askeland, D.R., 1990. The Science and Engineering of Materials. Chapman and Hall, London, 921 s.
78. Massalski, T.B., Laughlin, D.E., 2017. Phase diagrams, 1-14. *In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (Eds: S. Hashmi). Oxford, Elsevier.
79. Smallman, R.E., Ngan, A.H.W., 2014. Modern Physical Metallurgy (Eighth Edition). Butterworth-Heinemann, 697 s.
80. John, V. B., 1974. Understanding Phase Diagrams, Red Globe Press, London, 94 s.
81. Aksöz, N., 2013. Metalik Alaşımların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi. Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, 125 s.
82. Baskaran, S., 2010. Structure and Regulation of Yeast Glycogen Synthase, Doktora tezi, Hindistan, 130 s.
83. Ren, G., Collins, M.N., 2017. The effects of antimony additions on microstructures, thermal and mechanical properties of Sn-8Zn-3Bi alloys. **Materials and Design**, **119**: 133-140.
84. Yoon, S. W., Soh, J. R., Lee H. M., Lee, B. J., 1997. Thermodynamics-aided alloy design and evaluation of pb-free solder, Sn-Bi-In-Zn system. **Acta Metallurgica**, **45**: 951-960.
85. Milli Eğitim Bakanlığı, 2018. Elektrik-Elektronik Teknolojisi Alanı. Ankara, 110 s.
86. Manko, H.H., 1979. Solder and Soldering. McGraw-Hill Companies, New York, 350 s.
87. Nriagu, J.O., Pacyna, J.M., 1988. Quantitative assessment of worldwide

- contamination of air, water and soils by trace metals. **Nature**, **333 (6169)**: 134-139.
88. U.S. EPA, 2000. EPA's Terms of Environment. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 200 s.
 89. Harrison, P., Waites, G., 1998. The Cassell Dictionary of Chemistry, Cassell, London, 220 s.
 90. Monsalve, E.R., 1984. Lead ingestion hazard in hand soldering environments. Naval Weapons Center, China Lake, CA, 20 s.
 91. Liu, J. C., Zhang, G., Wang, Z. H., Ma, J. S., Suganuma, K., 2015. Thermal property, wettability and interfacial characterization of novel Sn-Zn-Bi-In alloys as low-temperature lead-free solders. **Materials and Design**, **84**: 331-339.
 92. Basaty, A.B., Deghady, A.M., Eid, E.A., 2017. Influence of small addition of antimony (Sb) on thermal behavior, microstructural and tensile properties of Sn-9.0Zn-0.5Al Pb-free solder alloy. **Materials Science & Engineering A**, **701**: 245-253.
 93. McCormack, M., Jin, S, Chen, H.S., 1994. New lead-free, Sn-Zn-In solder alloys. **Journal of Electronic Materials**, **23 (7)**: 687-690.
 94. Suganuma, K., 2001. Advances in lead-free electronics soldering. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, **5 (1)**: 55-64.
 95. Zhang, L., Xue, S., Gao, L., Sheng, Z., Ye, H., Xiao, Z., Zeng, G., Chen, Y., Yu, S., 2010. Development of Sn-Zn lead-free solders bearing alloying elements. **J Mater Sci: Mater Electron**, **21**: 1-15.
 96. Saad, G., Fawzy, A, Shawky, E., 2009. Effect of Ag addition on the creep characteristics of Sn-8.8 wt%Zn solder alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, **479**: 844-850.

97. El-Daly, A.A., Swilem, Y., Makled, M.H., El-Shaarawy, M.G., Abdraboh, A.M., Thermal and mechanical properties of Sn-Zn-Bi lead-free solder alloys. **Journal of Alloys and Compounds** **484**: 134-142.
98. El-Daly, A.A., Hammad, A.E., Al-Ganainy, G.S., Ibrahiem, A.A., 2014. Design of lead-free candidate alloys for low-temperature soldering applications based on the hypoeutectic Sn–6.5Zn alloy. **Materials and Design** **56**: 594-603.
99. Garcia, L.R., Osório, W.R., Peixoto, L.C., Garcia, A., Mechanical properties of Sn-Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array. **Materials Characterization** **61**: 212-220.
100. Attia Negm, S.E., Abdel Moghny, A.S., Ahmad, S.I., 2022. Investigation of thermal and mechanical properties of Sn-Zn and Sn-Zn-Bi near-eutectic solder alloys. **Results in Materials**, **15** (100316): 1-8.
101. Siewert, T., Liu, S., Smith, D. R., Madeni, J. C. 2002. Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free Solders. National Institute of Standards and Technology, Colorado School of Mines, 77s.
102. Meydaneri, F., Saatçi, B., 2010. Thermal coefficients and thermal conductivities of solid and liquid phases for pure Ag, Pure Sn and their binary alloys. **Int. J. Eng. Research & Development**, **2** (1): 81-91.
103. Cardarelli, F., 2008. Materials Handbook A Concise Desktop Reference. Springer, London, 1340 s.
104. NCMS, 1998. Technical Reports for the Lead Free Solder Project. Lead Free Solder Project CD-ROM, National Center for Manufacturing Sciences (NCMS).
105. Mhiaoui, S., Sar, F. Gasser, J.G., J., 2007. **Non-Cryst. Solids**, **353**: 3628-3632).
106. Arı, M., Saatçi, B., Gündüz, M., Payveren, M., Durmuş, S., 2008. Thermo-electrical characterization of Sn–Zn alloys. **Materials Characterization**, **59** (6): 757-763.

107. Lee, N.C., Casey, W., 2000. Soldering Technology for Area Array Packages. NEPCON WEST, Anaheim, CA.
108. Bahgat, A.A., El-Bahay, M.M., El-Mossalamy M.E., Mahdy, M., 2005. Creep behavior of the eutectic Sn- 9 wt.% Zn alloy. **Intl. J. Pure & Appl. Phy.**, **1** (1): 55-69.
109. Lee, N. H., 2000. Lead-Free chip-scale soldering of packages. (Web sayfası: <http://www.chipscalereview.com/issues/0300/lead16.html>).
110. Lee, N.C., Slattery, J.A., Sovinsky, J.R., Artaki, I., Vianco, P.T., 1995. A drop-in lead-free solder replacement. *NEPCON West'95 Conference*. February 28-March 2, Anaheim, CA, 1994 pp.
111. Seelig, K., Suraski, D., 2000. The status of lead-free solder alloys, 1405-1409. *Proc. 50th IEEE 2000 Electronic Components and Technology Conference*, May 21-24, Las Vegas, NV, 1756 pp.
112. Yamashita, M., 1987. Resistivity correction factor for the four-probe method. **J. Phys. E: Sci. Instrum.**, **20**: 1454-1456.
113. Yılmaz, S., 2008. Dy₂O₃, Eu₂O₃, Sm₂O₃ Katkılanmış β -Bi₂O₃ Tipi Katı Elektrolitlerin Sentezlenmesi, Karakterizasyonları ve Katı Hal Oksijen İyonik İletkenliklerinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi, Ankara, 187 s.
114. Engin, S., 2013. Kontrollü Katılaştırılan Çok Bileşenli Ötektik Alaşımların, Mekanik ve Elektriksel Özelliklerinin Katılaştırma Parametrelerine Bağlılığının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri, 2013, 189 s.
115. Erciyes Üniversitesi, Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, (Web sayfası: <https://taum.erciyes.edu.tr/tr/taramali-elektron-mikroskobu-fesem>) (Erişim tarihi: Ocak 2023).

116. Ata Esener, P., 2017. Farklı Oranlarda Bor İlave Edilmiş AISI 4140 (42CrMo4) Islah Çeliğinin Isıl İşlemi ve Karakterizasyonu. Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, 99 s.
117. Zhou, S.X., Chiang, S.W., Xu, J.Z., Du, H.D., Li, B.H., Xu, C.J., Kang., F.Y., 2012. Modeling the inplane thermal conductivity of a graphite/polymer composite sheet with a very high content of natural flake graphite. **Carbon**, **50**: 5052-5061.
118. Smith, A.W., Rasor, N.S., 1956. Observed dependence of the low temperature thermal and electrical conductivity of graphite on temperature, type, neutron irradiation and bromination. **Phys. Rev.**, **104**: 885-891.
119. Pietenpol, W.B., Miley, H. A., 1929. Electrical resistivities and temperature coefficients of lead, tin, zinc and bismuth in the solid and liquid states. **Physical Review**, **34**: 1588-1600.
120. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., Black, M., 2003. Handbook of Induction Heating, Markel Dekker Inc, New York, 777 s.
121. Lifshitz, E. M., Pitaevskii, L. P., 1981. Physical Kinetics, Butterworth-Heinemann, Oxford, 652 s.
122. Vianco, P.T., Rejent, J.A., 1999. Properties of ternary Sn-Ag-Bi solder alloys: Part I-Thermal properties and microstructural analysis. **J. Electron. Mater.**, **28**: 1127-1137.
123. Jeffus, L. F., 2020. Welding principles and applications, 9th edition. Boston, MA: Cengage Learning, 960 s.
124. El-Daly, A.A., Swilem, Y., Makled, M.H., El-Shaarawy, M.G., Abdraboh, A.M., 2009. Thermal and mechanical properties of Sn-Zn-Bi lead-free solder alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, **484**: 134-142.
125. Ohtani, H., Okuda, K., Ishida, K., 1995. Thermodynamic study of phase equilibria

in the Pb-Sn-Sb system. **J. Phase Equil.**, **16**: 416-429.

126. El-Daly, A.A., Hammad, A.E., Al-Ganainy, G.A., Ibrahim, A.A., 2013. Enhancing mechanical response of hypoeutectic Sn-6.5Zn solder alloy using Ni and Sb additions. **Mater. Des.**, **52**: 966-973.
127. El-Daly, A.A., Hammad, A.E., Fawzy, A., Nasrallah, D.A., 2013. Microstructure, mechanical properties, and deformation behavior of Sn-1.0Ag-0.5Cu solder after Ni and Sb additions. **Mater. Des.**, **43**: 40-49.
128. Ma, P., Wei, Z.J., Jia, Y.D., Yu, Z.S., Prashanth, K.G., Yang, S.L., Li, C.G., Huang, L.X., Eckert, J., 2017. Mechanism of formation of fibrous eutectic Si and thermal conductivity of SiCp/Al-20Si composites solidified under high pressure. **Journal of Alloys and Compounds**, **709**: 329-336.
129. Ocak, Y., Aksöz, S., Maraşlı, N., Çadırlı, E., 2010. Dependency of thermal and electrical conductivity on temperature and composition of Sn in Pb-Sn alloys. **Fluid Phase Equilibria**, **295**: 60-67.
130. Ata Esener, P., Aksöz, S., Öztürk, E., Maraşlı, N., 2020. The variations of electron and phonon contributions to the thermal conductivity with temperature in the Sn-Bi-In-Zn alternative lead-free solder alloys. **Physics of Metals and Metallography**, **121**: 1365-1374.
131. Hertzberg, J.L., Hertzberg, R.W., Vinci, R.P., 2012. Deformation and fracture mechanics of engineering materials, 5th ed. Wiley, 784 s.
132. Liu, S., Xue, S.B., Xue, P., Luo, D.X., 2015. Present status of Sn-Zn lead-free solders bearing alloying elements. **J. Mater. Sci.: Mater. Electron.** **26**: 4389-4411.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Pınar ATA ESENER

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM BİLGİLERİ

- Lisans, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik, 2008-2012.
- Yüksek Lisans, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, 2012-2015.
- Yüksek Lisans (Tezsiz), Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik, 2012-2013.
- Yüksek Lisans, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi (Erciyes Üni. Ortak Program), Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, 2014-2017.
- Doktora, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora (YÖK 100/2000), Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (Mikro ve Nanoteknoloji), 2017- 2023.

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

- Ata P., Karamazi Y., Bayram Ü., Aksöz S., Keşlioğlu K., Maraşlı N., 2016. Solid-liquid interfacial energy of solid succinonitrile in equilibrium with succinonitrile-(D) camphor-aminomethylpropanediol eutectic liquid. *International Journal of Thermophysics*, 37, ss 1-13.

- Bayram, Ü., Karamazı, Y., Ata, P., Aksöz, S., Keşlioğlu, K., & Maraşlı, N., 2016. Dependence of microstructure, microhardness, tensile strength and electrical resistivity on growth rates for directional solidified Zn-Al-Sb eutectic alloy. *International Journal of Materials Research*, 107(11), ss 1005-1015.
- Karamazı, Y., Bayram, Ü., Ata, P., Aksöz, S., Keşlioğlu, K., & Maraşlı, N., 2016. Dependence of microstructural, mechanical and electrical properties on growth rates in the directional solidified Zn-Al-Bi eutectic alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26, ss 2320-2335.
- Şahin, M., Çadırlı, E., Bayram, Ü., Ata Esener, P., 2018. Investigation the thermo-electrical properties of the $\text{Sn}_{91.2-x}\text{-Zn}_{8.8}\text{-Ag}_x$ alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 132, ss 317-325.
- Ata Esener, P., Altıntaş, Y., Bayram, Ü., Öztürk, E., Maraşlı, N., Aksöz, S., 2019. Effect of Sn contents on thermodynamic, microstructure and mechanical properties in the Zn₉₀-Bi₁₀ and Bi₈₈-Zn₁₂ based ternary alloys. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, ss 3678-3691.
- Ata Esener, P., Aksöz, S., Öztürk, E., Maraşlı, N., 2020. The variations of electron and phonon contributions to the thermal conductivity with temperature in the Sn-Bi-In-Zn alternative lead-free solder alloys. *Physics of Metals and Metallography*, 121 (14), ss 15-24.
- Ata Esener, P., Bayram, Ü., Öztürk, E., Aksöz, S., Maraşlı, N., 2020. Electrical and thermal conductivity and phonon contribution to the thermal conductivity in the Bi-In System. *J. of Thermal Science and Technology*, 40 (2), ss 367-378.
- Aksöz, S., Ata Esener, P., Öztürk, E., Marasli, N., 2022. Effects of Bi content on thermal, microstructure and mechanical properties of Sn-Bi-In-Zn solder alloy systems. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 33 (1), ss 11-26.

- Ata Esener, P., Demirel, B., Aksöz, S., 2023. Effect of Sb and In additives on thermal and electrical properties of Sn-9Zn-4Bi alternative lead-free solder alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 296, 127223.

