

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ METALİK CAMININ
MEKANİK, TERMAL, ELEKTRİKSEL VE MANYETİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Satiye KORKMAZ

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL**

Yozgat 2011

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ METALİK CAMININ
MEKANİK, TERMAL, ELEKTRİKSEL VE MANYETİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Satiye KORKMAZ

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL**

Yozgat 2011

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün Fizik Anabilim Dalı 7011050015 numaralı öğrencisi Satiye KORKMAZ'ın hazırladığı “ $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Mekanik, Termal, Elektriksel ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 08/08/2011 Pazartesi günü saat 14:00'te yapılmış, tezin onayına OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Recep ŞAHİNGÖZ



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL (Danışman)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Fatma MEYDANERİ



ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun ..19..../8../20..11.. tarih ve ..10.. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

19/8/2011



Enstitü Müdürü
(Ünvanı, Adı Soyadı)

Doç. Dr. Recep ŞAHİNGÖZ
Bozok Üniversitesi
Fen Bil. Enst. Müdürü

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. METALİK CAMLAR	1
1.1. Giriş	1
1.2. Metalik Camlarla İlgili Temel Kavramlar.....	2
1.2.1. Amorf Yapı.....	2
1.2.2. Camsı Yapının Oluşumu.....	4
1.2.3. Camsı Geçiş Sıcaklığı.....	4
1.2.4. Topolojik Düzensizlik.....	5
1.3. Metalik Camların Kullanım Alanları.....	6
1.4. Metalik Camların Tarihçesi ve Son Zamanlarda Yapılan Çalışmalar.....	7
2. METALİK CAM ÜRETİM METODLARI	11
2.1. Soğuk Dönen Disk Metodları.....	11
2.1.1. Sıvı Metal Savurma Metodu.....	11
2.1.2. Düzlem Akışlı Döküm Metodu.....	12
2.2. Sıvı Metal Çekme Metodu.....	13
2.3. Sıvı Metal Üstten Akıtma Metodu.....	14
2.4. Sıvı Metal Fırlatma Metodu.....	14
3. MEKANİK, TERMAL, ELEKTRİKSEL VE MANYETİK ÖZELLİKLER....	16
3.1. Mekanik Özellikler.....	16
3.1.1. Sertlik.....	17
3.1.1.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi.....	17

3.1.1.2. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi.....	18
3.1.1.3. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi.....	19
3.1.1.4. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi.....	20
3.1.2. Çekme Testi.....	23
3.1.2.1. Elastisite Katsayısı (Young Modülü).....	23
3.1.2.2. Rezilyans.....	25
3.1.2.3. Akma Gerilmesi.....	26
3.1.2.4. Çekme Dayanımı.....	27
3.1.2.5. Uzama.....	27
3.1.2.6. Elastik Deformasyonun Zamana Bağlılığı (Anelastisite Etkisi).....	28
3.2. Termal Özellikler.....	29
3.2.1. Isı Kapasitesi ve Öz Isı	29
3.2.2. Isı Kapasitesi Modelleri.....	31
3.2.2.1. Klasik Model.....	31
3.2.2.2. Einstein Modeli.....	32
3.2.2.3. Debye Modeli.....	33
3.2.3. DSC ile Öz Isı (C_p) Ölçüm Metodları.....	35
3.2.3.1. Sürekli Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü.....	35
3.2.3.1.1. Referanssız - Sürekli Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü.....	35
3.2.3.1.2. Referanslı - Sürekli Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü.....	36
3.2.3.2. Basamaklı Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü.....	39
3.2.3.2.1. Referanssız - Basamaklı Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü.....	39
3.2.3.2.2. Referanslı - Basamaklı Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü.....	40
3.3. Elektriksel Özellikler.....	41
3.3.1. Elektriksel İletkenlik	41
3.3.1.1. DC İki Nokta Yöntemi.....	42
3.3.1.2. DC Dört Nokta Yöntemi.....	43
3.3.1.3. Değmesiz Özdirenç Yöntemi.....	44

3.4. Manyetik Özellikler.....	44
3.4.1. Manyetik Duygunluk.....	44
3.4.2. Manyetik Geçirgenlik.....	45
3.4.3. Manyetik Alanla Şekil Değişimi.....	45
3.4.4. Curie Sıcaklığı.....	46
3.4.5. Histerisis Eğrisi.....	47
3.4.6. Hall Olayı.....	47
4. MATERYAL VE METOD.....	51
4.1. Numunenin Hazırlanışı.....	51
4.2. Elementel Analiz Ölçümü.....	52
4.3. X-Işınları Kırınımı Ölçümü.....	53
4.4. Vickers Sertlik Ölçümü	54
4.5. Çekme Testi	56
4.6. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi.....	57
4.7. DC Dört Nokta Yöntemi İle Elektriksel İletkenlik Ölçümü.....	60
4.8. Hall Ölçümü.....	61
5. SONUÇLAR.....	65
5.1. X- Işını Kırınımı Sonuçları.....	65
5.2. Elementel Analiz Sonuçları	68
5.3. Vickers Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	68
5.4. Çekme Testi Sonuçları	72
5.5. DSC Sonuçları.....	73
5.6. Elektriksel İletkenlik Sonuçları.....	76
5.7. Hall Ölçüm Sonuçları.....	77
TARTIŞMA.....	81
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	86

Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ METALİK CAMININ MEKANİK, TERMAL, ELEKTRİKSEL VE MANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Satiye KORKMAZ

**Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

2011; Sayfa: 86

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL

ÖZET

Bu çalışmada, üstün manyetik özellikleri ile dikkat çeken ve teknolojiye önemli uygulama alanlarına sahip olan Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camının mekanik, termal, elektriksel ve manyetik özellikleri incelendi. Düzlemsel akışlı döküm metodu ile üretilmiş Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camı, kül fırınında 500°C'de 5, 10, 30, 60 ve 120 dk sürelerle tavlandı ve her bir numune için XRD analizleri ve Vickers mikrosertlik ölçümleri yapıldı. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camına çekme testi uygulandı. Numunenin öz direnci, dört nokta DC elektriksel iletkenlik ölçüm sistemi ile ölçüldü. Manyetik ölçümler için Hall ölçüm sistemi kullanıldı ve yüzey öz direncinin, yüzey taşıyıcı yoğunluğunun, Hall katsayısının ve Hall mobilitesinin manyetik alanla değişimi incelendi. Numunenin DSC analizleri yapıldı ve öz ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişimi çalışıldı.

Anahtar Kelimeler: Metalik Cam, Vickers Sertlik Ölçümü, Elektriksel İletkenlik, Hall Mobilitesi, Özısı

**INVESTIGATION OF MECHANIC, THERMAL, ELECTRICAL AND
MAGNETIC PROPERTIES OF Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ METALLIC GLASS**

Satiye KORKMAZ

**Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
Master of Science Thesis**

2011; Page: 86

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mustafa EROL

ABSTRACT

In this study, mechanical, thermal, electrical and magnetic properties of Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metallic glass that is noted for its superior magnetic properties and significant technological application areas were investigated. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metallic glass which was produced by planar flow casting method was annealed in a muffle furnace at 500°C for 5, 10, 30, 60 and 120 min periods and XRD analysis and Vickers microhardness measurements were done for all samples. Tensile tests were applied to Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metallic glasses. In order to measure resistivity, four point DC electrical measurement system was used. Hall measurement system was used for magnetic measurements and the change of surface resistivity, surface carrier density, Hall coefficient and Hall mobility with magnetic field were examined. DSC analysis of the samples were done and the change of specific heat capacity with temperature were studied.

Keywords: Metallic Glass, Vickers Hardness Measurement, Electrical Conductivity, Hall Mobility, Specific Heat.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL'a ve bölüm başkanımız Doç. Dr. Recep Şahingöz'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tavsiyelerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. Uğur BÖYÜK'e, deneysel çalışmalarımla esnasındaki desteklerinden dolayı doktora öğrencisi Sevda ENGİN'e, uzman Mehmet GÜMÜŞ'e ve yüksek lisans öğrenimim boyunca manevi desteğini esirgemeyen arkadaşım Songül ERTUĞRUL'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi yönden desteğim olan, bugünlere gelmemde en büyük katkı sahibi olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Metalik Camlar ve Kristal Yapılı Malzemelerin Karşılaştırılması.....	16
Tablo 3.2. Sertlik Ölçme Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	22
Tablo 3.3. Bazı Metallerin Oda Sıcaklığındaki Elastiklik modülleri.....	25
Tablo 3.4. Farklı Malzemelerin Çekme Mukavemetleri.....	27
Tablo 3.5. Kompozisyona Bağlı Olarak Curie Sıcaklıklarının Değişimi.....	46
Tablo 5.1. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Numunesi için Tavlama Süresine Göre Ortalama Mikrosertlik Ölçüm Değerleri.....	69
Tablo 5.2. Bazı Metalik Camların ve Fe, Ni ve B Elementlerinin Vickers Sertlik Değerleri.....	71
Tablo 5.3. Bazı Metalik Camların ve $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Çekme Mukavemetleri.....	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Çeşitli Boyutlardaki Zr ya da Mg Tabanlı İri Hacimli Metalik Camların Çubuk ve Plaka Şeklindeki Gösterimleri.....	2
Şekil 1.2. Amorf ve Kristal Yapılı Katının Şiddet Piklerinin ve Atomik Pozisyonlarının Şematik Gösterimi.....	3
Şekil 1.3. a) Kısa ve Uzun Mesafeli Atomik Düzen (Kristal Yapı), b) Kısa Mesafeli Atomik Düzen (Amorf Yapı).....	3
Şekil 1.4. Eriyik Bir Sıvının Soğutulması Sırasında Sıcaklık ile Hacmin Değişimi.....	5
Şekil 1.5. Tek Atomlu ve İki Atomlu Örgüler İçin Kimyasal ve Topolojik Düzensizlikler.....	6
Şekil 1.6. Duwez ve Arkadaşları Tarafından Hızlı Soğutma Deneylerinin Yapıldığı Tabanca Soğutma Cihazı	8
Şekil 2.1. Sıvı Metal Savurma Metodu.....	12
Şekil 2.2. Düzlemsel Akışlı Döküm Metodu.....	13
Şekil 2.3. Sıvı Metal Çekme Metodu.....	13
Şekil 2.4. Sıvı Metal Üstten Akıtma Metodu	14
Şekil 2.5. Sıvı Metal Fırlatma Metodu.....	15
Şekil 3.1. Brinell Sertlik ölçme yönteminin şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.2. a) Vickers Sertlik Ölçme Yönteminin Şematik Gösterimi, b) Batıcı Ucun Numune Yüzeyinde Bıraktığı İzin Fotoğrafı.....	19
Şekil 3.3. (a) Vickers İzi Geometrisi (b) Knoop İzi Geometrisi.....	20
Şekil 3.4. Rockwell Sertlik Ölçme Yönteminin Şematik Gösterimi.....	21
Şekil 3.5. Elastisite Modülü.....	24
Şekil 3.6. Gerinme, Gerilme ve Rezilyans İlişkisi.....	25
Şekil 3.7. Özel Akma Gösteren Mal Malzemelerde Mühendislik Gerilmesi.....	26
Şekil 3.8. Çelik Bir Numune için Gerilmenin Birim Uzamayla Değişimi.....	28
Şekil 3.9. Metallerin Oda Sıcaklığında (T=25 C) Öz Isı Kapasitelerinin Atom Numarasıyla Değişimi.....	30
Şekil 3.10. Klasik Modelde Isı Kapasitesinin Sıcaklıkla Değişimi.....	31

Şekil 3.11. Klasik, Einstein ve Debye Isı Kapasitesi Modellerinin Karşılaştırılması...	34
Şekil 3.12. Referanssız - Sürekli Modda Isı Akışı - Sıcaklık Verileri.....	36
Şekil 3.13. Referanslı - Sürekli Modda Isı Akışı - Sıcaklık Verileri.....	37
Şekil 3.14. Referanslı - Sürekli Modda Eğrilerde Düzeltme.....	38
Şekil 3.15. Referanssız - Basamaklı Modda Isı Akışı - Sıcaklık Verileri.....	39
Şekil 3.16. Referanslı - Basamaklı Modda Isı Akışı - Sıcaklık Verileri.....	40
Şekil 3.17. DC İki Nokta Ölçüm Tekniğinin Şematik Gösterimi.....	42
Şekil 3.18. DC Dört Nokta Ölçüm Tekniğinin Şematik Gösterimi.....	43
Şekil 3.19. Ferromanyetik Bir Malzemenin Histerisis Eğrisi.....	47
Şekil 3.20. Hall Olayının Şematik Gösterimi.....	48
Şekil 3.21. Hall Olayında Yük Dağılımları.....	49
Şekil 4.1. Tavlama İşleminde Kullanılan Protherm Kül Fırını.....	51
Şekil 4.2. TruSpec Micro Elementel Analiz Cihazı.....	52
Şekil 4.3. Bruker AXS D8 Model XRD Cihazı.....	53
Şekil 4.4. Panalytical X-Pert Pro XRD Cihazı.....	54
Şekil 4.5 Sertlik Analizleri için Numunelerin Kalıplanması	55
Şekil 4.6. Mikrosertlik Test Cihazı.....	55
Şekil 4.7. Mikrosertlik Test Cihazının Şematik Görünüşü.....	56
Şekil 4.8. Shimadzu AG-XD50Kn Çekme-Basma Test Cihazı.....	57
Şekil 4.9. Malzemelere Kontrollü Sıcaklık Programı Uygulandığında Oluşabilecek Değişimleri Gösteren Diferansiyel Termogram Şeması.....	58
Şekil 4.10. SETARAM DSC 131 Şematik Gösterimi.....	58
Şekil 4.11. Elektriksel İletkenlik Ölçüm Kiti	60
Şekil 4.12. DC Dört Nokta Elektriksel İletkenlik Ölçüm Tekniği Çalışma Prensibi.....	61
Şekil 4.13. Direnç (a ve b) ve Hall Mobilitesi (c ve d) Ölçümleri için Şematik Gösterimi.....	62
Şekil 4.14. Lakeshore 7700A Tipi Yüksek Empedans Hall Etkisi Sistemi	63

Şekil 4.15. Hall Etkisi Ölçüm Sistemi Blok Diyagramı.....	64
Şekil 5.1. Tavlanmamış $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının XRD Desenleri	65
Şekil 5.2. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ ve FeNi Alaşımları için XRD Desenleri.....	66
Şekil 5.3. Tavlanmamış ve 500 °C’de 5 dk, 10 dk, 30 dk, 60 dk ve 120 dk Sürelerle Tavlanmış $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camı için XRD Analiz Verileri.....	67
Şekil 5.4. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Numunesi için EDX Analizi	68
Şekil 5.5. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Vickers Sertlik Değerlerinin Tavlama Süresi ile Değişimi.....	70
Şekil 5.6. Metallerin Vickers Sertliklerinin Atom Numarasıyla Değişimi.....	71
Şekil 5.7. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Gerilme (σ)-Birim Uzama (ϵ) Grafiği.....	72
Şekil 5.8. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ İçin a) 10 K/dk, b) 15 K/dk, c) 20K/dk, d) 25K/dk Isıtma Hızları Sonucunda Elde Edilen HF-T Verileri.....	74
Şekil 5.9. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ İçin 10 K/dk, 15 K/dk, 20K/dk, 25K/dk Isıtma Hızları Sonucunda Elde Edilen C_p -T Verileri.....	75
Şekil 5.10. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının 10 K/dk Isıtma Hızı İçin Elde Edilen C_p -T Verilerinin B, Fe ve NiFe C_p -T Verileri İle Karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.11. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Öz direncinin Sıcaklıkla Değişimi.....	77
Şekil 5.12. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Yüzey Öz direncinin Manyetik Alanla Değişimi.....	78
Şekil 5.13. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Hall Katsayısının Manyetik Alanla Değişim Değişimi.....	79
Şekil 5.14. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Yüzey Taşıyıcı Yoğunluğunun Manyetik Alanla Değişimi.....	80
Şekil 5.15. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Hall Mobilitesinin Manyetik Alanla Değişimi.....	80

KISALTMALAR LİSTESİ

$B_{iç}$: Numune İçindeki Manyetik Alan
C	: Isı Kapasitesi
c	: Öz Isı
C_v	: Sabit Hacimdeki Isı Kapasitesi
C_p	: Sabit Basıncıdaki Isı Kapasitesi
CF	: Düzeltme Faktörü
COY	: Cam Oluşturma Yeteneği
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
E	: Elastisite Modülü
E_H	: Yük Dağılımından Kaynaklanan Elektrik Alanın Büyüklüğü
ε	: Birim Uzama Oranı
ε_a	: Elastik Bölgedeki Maksimum Birim Uzama
F_B	: Manyetik Kuvvet
GPa	: Giga Pascal
G	: Gauss
g	: Yerçekimi İvmesi
H_B	: Brinell Sertlik Değeri
H_V	: Vickers Sertlik Değeri
H_K	: Knoop Sertlik Değeri
H	: Manyetik Alan Şiddeti
HF	: Isı Akışı
I	: Akım
JMA	: Johnson-Mehl-Avrami
K	: Kelvin
μ	: Manyetik Geçirgenlik
m	: Kütle

M	: Manyetizasyon
MS	: Melt Spinning
MPa	: Megapascal
n	: Taşıyıcı Yoğunluğu
ρ	: Özdirenç
R_c	: Metal Probu Kntak Direnci
R_s	: İletken Direnci
R_{sp}	: Probu Altındaki Yüzey Direnci
R_H	: Hall Katsayısı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
T_m	: Erime Sıcaklığı
T_g	: Camı Geçiş Sıcaklığı
v_s	: Sürüklenme Hızı
V_E	: Ettingshausen Etkisi
V_H	: Hall Voltajı
V_N	: Nernst Etkisi
V_R	: Righi-Leduc Potansiyeli
q	: Elektron Yükü
Θ_D	: Debye Sıcaklığı
Θ_E	: Einstein Sıcaklığı
σ	: Çekme Gerilimi
XRD	: X-Işını Kırınımı
w_D	: Kesilme Frekansı
χ	: Manyetik Duygunluk
ΔT	: Sıcaklık Değişimi

1. METALİK CAMLAR

1.1. Giriş

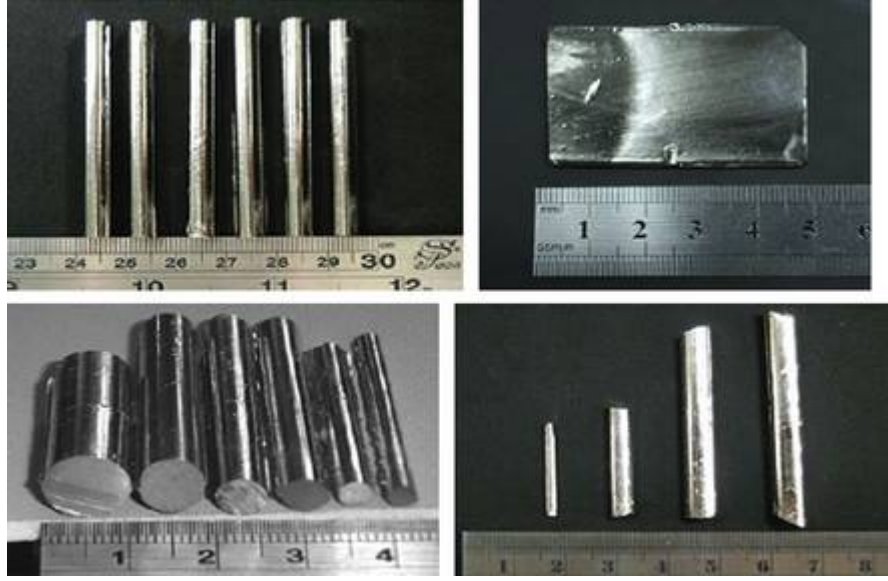
Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, kristal yapılu alaşımlardan daha farklı özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Üstün özellikleri ve amorf yapıları sayesinde yeni bir malzeme sınıfı haline gelen metalik camlar, son yılların en çok araştırılan konularından biri haline gelmiştir.

Ergimiş metal alaşımının, çekirdek oluşumunun ve kristal büyümesinin önlenmesi amacıyla ani soğuma hızıyla (10^5 - 10^{10} K/s) soğutularak; tıpkı sıvılar gibi düzensiz yapıda katılaşmaları sonucunda, elde edilen amorf yapıdaki alaşıma 'metalik cam' denir. Metalik camlar, diğer metal ya da alaşımlarda gözlenmeyen sıra dışı özelliklere sahiptir. Bu malzemelerde, dislokasyon miktarı yok denecek kadar azdır. Çünkü metalik camlarda kristallerde olduğu gibi yapısal bir düzene rastlanmamaktadır. Metalik camlar; amorf yapıda olmalarına karşın atomlar arasında kimyasal bağlar mevcut olduğundan, tamamen düzensiz yapıya sahip değildir. Ayrıca bu malzemelerde segregasyon bölgeleri de mevcut değildir. Metalik camların sahip olduğu bu kimyasal ve yapısal homojenlik; malzemelerin mekanik, elektrik, manyetik ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Şekil 1.1'de çeşitli boyutlardaki Zr ya da Mg tabanlı iri hacimli metalik camların çubuk ve plaka şeklindeki gösterimlerine yer verilmiştir.

Metalik camların keşfedilmeleri Duwez ve arkadaşlarının hızlı soğutma tekniklerini geliştirmeleri ile ortaya çıkmıştır. İlk hızlı katılaştırma ise 1960'lı yıllarda Duwez ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [1]. Bu çalışmada Au-Si ikili alaşımını hızlı katılaştırma ile amorf yapıda elde etmişlerdir. Turnbull ve arkadaşları ise cam oluşturan eriyiklerde gözlenen camsı geçiş sıcaklığını, hızlı soğutulan metalik camlarda da gözlediklerini rapor etmişlerdir [2].

Farklı elementlerin farklı kompozisyonları ile oluşturulmuş metalik camların özellikleri, kristal yapılu alaşımlardan oldukça farklılık göstermektedir. Mekanik

özellikleri, korozyon dirençleri, elektriksel iletkenlikleri ve manyetik özellikleri açısından teknolojide önemli bir yere sahip olan metalik camlar üzerine yapılan çalışmalar son zamanlarda hız kazanmıştır. Dolayısıyla, amorf yapıdaki metalik camların üretilmesi için çeşitli yeni yöntemler geliştirilmiştir.



Şekil 1. 1. Çeşitli Boyutlardaki Zr ya da Mg Tabanlı İri Hacimli Metalik Camların Çubuk ve Plaka Şeklindeki Gösterimleri [3]

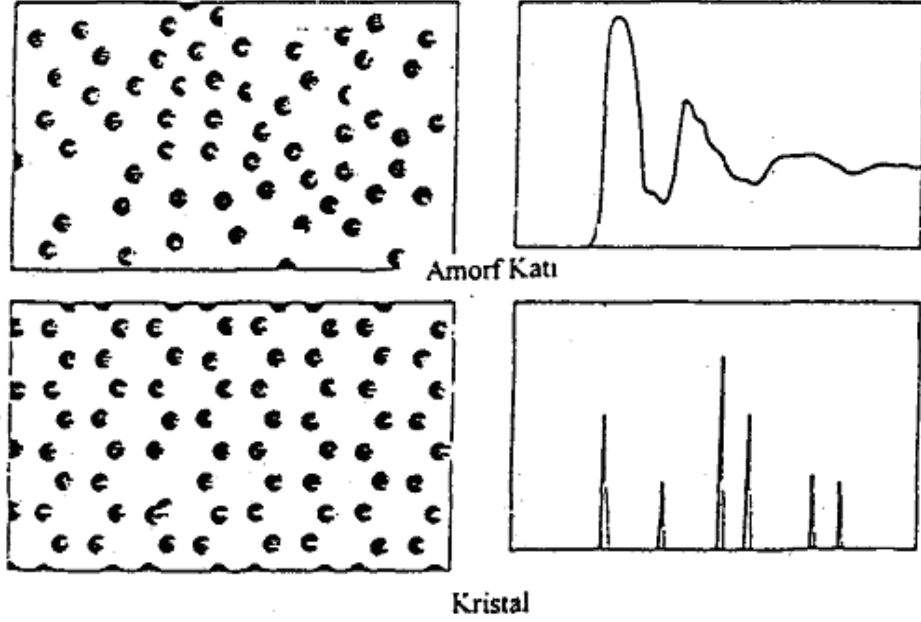
1.2. Metalik Camlarla İlgili Temel Kavramlar

1.2.1. Amorf Yapı

Metalik camları kristal alaşımlardan ayıran en önemli özellik amorf yapıda olmalarıdır. Terim itibariyle; amorf katı sabit bir şekle ve mukavemete sahip olan, atom dizilişlerinin rastgele düzenlendiği, kristalleşmiş katıların düzenli yapısına benzer bir yapısal özellik göstermeyen katılardır.

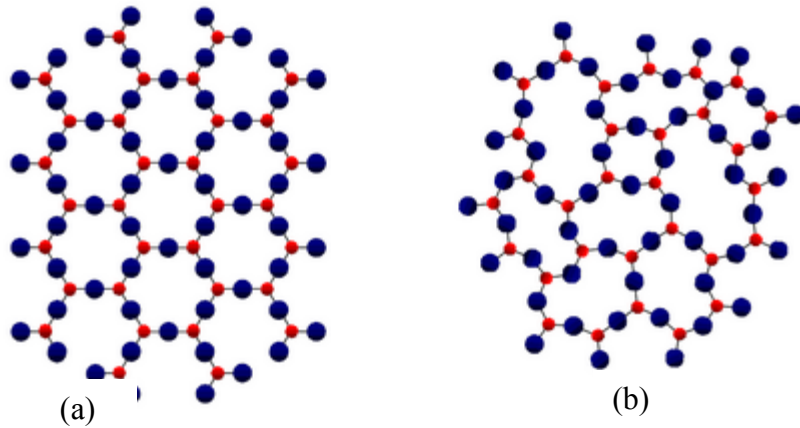
Şekil 1.2'de görüldüğü üzere amorf katının X-ışını piklerinde belirginlik gözlenmemekle birlikte, kristal yapı katıda keskin Bragg pikleri gözlemlenmektedir [4]. X-ışını ile birlikte; nötron ve elektron difraksiyonu, elektron

mikroskobu ile yapılan çalışmalarla da amorf yapı hakkında daha fazla bilgi edinmek mümkündür.



Şekil 1.2. Amorf ve Kristal Yapılı Katının Şiddet Piklerinin ve Atomik Pozisyonlarının Şematik Gösterimi [5]

Amorf yapı ile kristal yapının atomik dizilişleri arasındaki fark da dikkate değerdir. Şekil 1.3'te amorf ve kristal yapının atomik düzenleri görülmektedir. Kristal örgü; hem kısa hem de uzun mesafeli atomik düzene sahiptir. Amorf katı ise kısa mesafeli düzene sahip olmakla beraber, atomlar gelişigüzel paketlenmişlerdir.



Şekil 1.3. (a) Kısa ve Uzun Mesafeli Atomik Düzen (Kristal Yapı), (b) Kısa Mesafeli Atomik Düzen (Amorf Yapı)

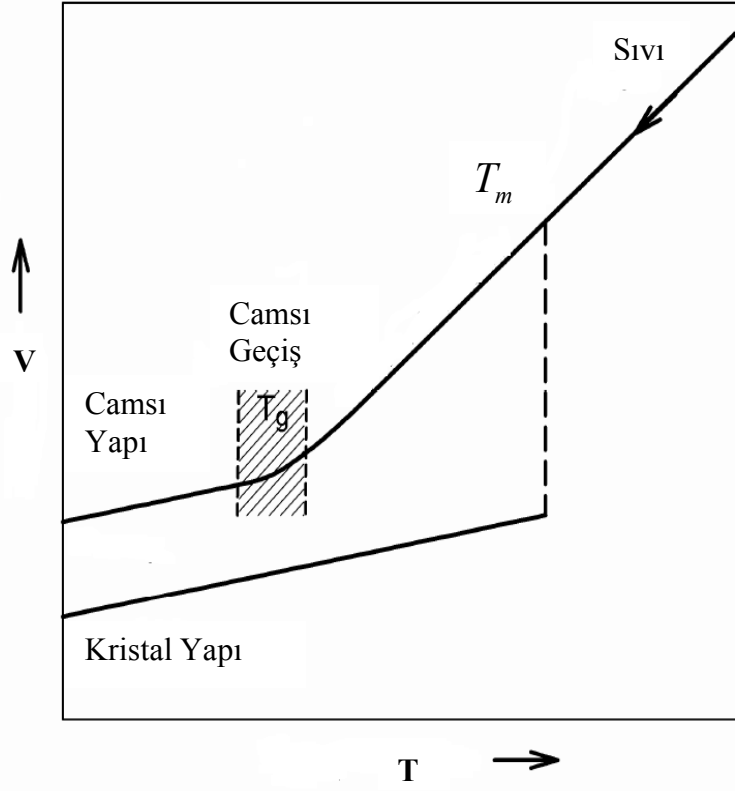
Metalik camlarda; camsı yapının belli bir periyodikliği olmadığı gibi, yapı her doğrultuda farklılıklar gösterebilmektedir. Metalik camı daha iyi tanımak için camsı yapıyı karakterize eden atom sayılarını, kristal yapılı bir malzemenin atom sayılarıyla karşılaştırmakta yarar vardır [4].

1.2.2. Camsı Yapının Oluşumu

Metallerin amorf yapıya sahip olmaları; eriyik metal alaşımının ani soğutulması sonucu çekirdek oluşumunun yani kristalizasyonun önlenmesiyle mümkün olmaktadır. Alaşımın soğuma hızı, yapının yerleşim düzenini etkilemektedir. Alaşım gerekli yerleşimi sağlayamadan katılaştığı için kararlı bir yapı elde edilememektedir. Dolayısıyla eriyik metal alaşımından camsı yapı elde edebilmek için kristalizasyonu geçecek şekilde soğutmak yeterli olmaktadır.

1.2.3. Camsı Geçiş Sıcaklığı

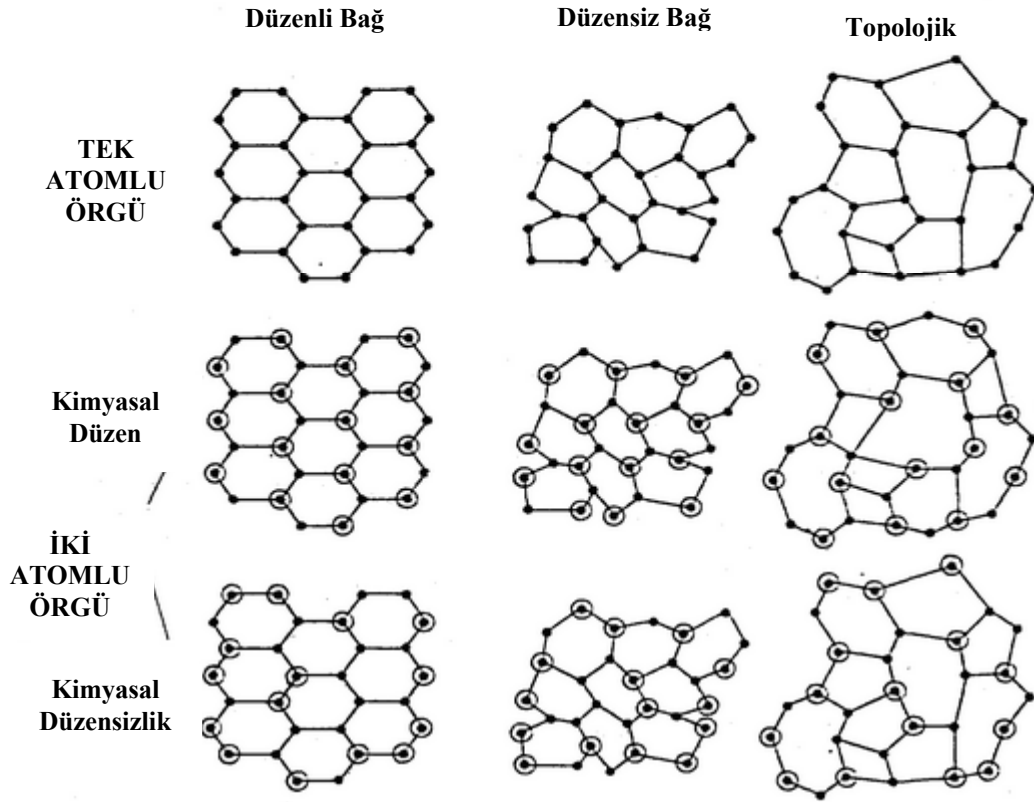
Eriyik bir metal alaşımı hızlı soğutularak katılaştırıldığında Şekil 1.4'te görüldüğü gibi T_m ergime sıcaklığında eriyiğın hacminde süreksizlik gözlenir. T_m sıcaklığının altında kristallenme olmazsa, hızlı soğutulmuş metalin hacmi azalacaktır. Camsı geçiş dediğimiz T_g sıcaklık aralığında ise soğuma hızı artırılırsa yapı amorf hale gelecektir. Metalik cam yapısından, yalnızca camsı geçiş sıcaklığının altında bahsetmek mümkündür.



Şekil 1.4. Eriyik Bir Sıvının Soğutulması Sırasında Sıcaklık ile Hacmin Değişimi [6]

1.2.4. Topolojik Düzensizlik

Topolojik düzensizlik camsı yapıların karakteristik bir özelliğidir. Camsı yapıların en önemli özelliği, tekrar düzenli yapıya dönememeleridir. Şekil 1.5'te tek atomlu ve iki atomlu örgüler için kimyasal ve topolojik düzensizlikler gösterilmiştir. Topolojik düzensizlikte, bağ uzunlukları farklılık gösterebildiği gibi komşu atom sayıları da değişebilmektedir. Metalik camlarda hem bağ düzensizliği, hem kimyasal düzensizlik hem de topolojik düzensizlik mevcuttur.



Şekil 1.5. Tek Atomlu ve İki Atomlu Örgüler İçin Kimyasal ve Topolojik Düzensizlikler [4]

1.3. Metalik Camların Kullanım Alanları

Metalik camlar; çok önemli bilimsel araştırma konusu olmasının yanı sıra, uygulama alanları ile de teknolojiye önemli bir yere sahiptirler. Metalik camların sahip oldukları özelliklere göre kullanım alanlarını, sebepleriyle birlikte özetle şu şekilde sınıflandırmak mümkündür:

Yüksek elektriksel özellik: Metalik camlar, elektronik devrelerde önemli bir yere sahiptir. Yüksek frekans uygulamalarında, Eddy akım kayıplarını minimuma indirmek, malzeme seçimi ve üretimiyle doğrudan ilgilidir. Numunenin mümkün olduğunca ince olması Eddy kayıplarını azaltmaktadır. Bu şartları metalik camlar sağlayabilmektedir.

Yumuşak manyetik özellik: Yumuşak manyetik özellik transformatörler için aranan bir özelliktir. Fe tabanlı amorf alaşımlarda histerisis eğrisinin dar olması sebebiyle ısı kaybı minimum seviyedir. 25 kVA transformatörlerde metalik camların kullanımı; güç kayıplarını Fe- % 3,5Si elektrik çeliklerine göre %75 civarında düşürmektedir [7].

Yüksek mukavemet ve sertlik: Al tabanlı amorf alaşımların mukavemetleri, normal alaşımlara kıyasla üç kat daha fazladır. Bu sebeple metalik camlar, otomobil sanayii, uçak sanayii ve havacılıkta önemli bir yere sahiptir.

Korozyon direnci; Metalik camlar, homojen yapıları sayesinde yüksek korozyon direncine sahiptir. Klorürlü ve sülfatlı solüsyonlara karşı, iyi derecede korozyon direncine sahip metalik camlar, bu özelliği sayesinde, kimyasal filtreler, reaktörler ve elektrotlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Metalik camların bütün bu avantajların yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Dezavantajları şu şekilde listelenebilir:

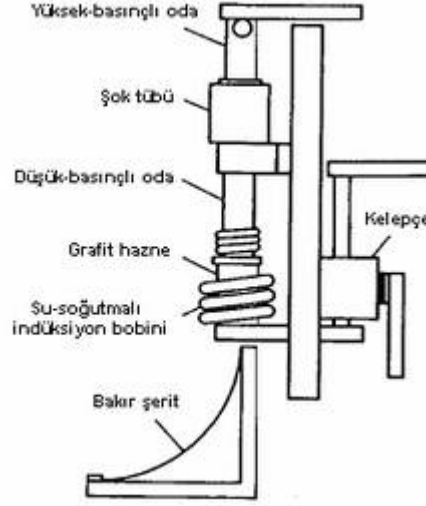
- Maliyetlerinin çok yüksek olması,
- Cam geçiş sıcaklığının altında kullanılamamaları,
- Tokluklarının düşük olması,
- Sıcaklığa karşı hassas olmaları.

1.4. Metalik Camların Tarihçesi ve Son Zamanlarda Yapılan Çalışmalar

Metalik cam, ilk kez Kramer tarafından üretilmeye çalışılmıştır [8]. Klement [9], Duwez ve gurubu ise metalik sıvıları 10^5 - 10^{10} K/s gibi yüksek hızlarda soğutarak amorf metalik alaşım elde etmeyi başarmıştır [10].

Şekil 1.6'da ilk defa 1965 yılında Duwez ve arkadaşları tarafından kullanılan hızlı soğutma deneylerinin yapıldığı tabanca soğutma cihazı görülmektedir. Bu teknikte alaşımlar fırın içinde eritilir ve eriyik haldeki alaşıma şok basınç uygulanır. Bu şok

basınçla mikron boyutuna ayrılan eriyik, damlalar halinde sabit ve daire şeklindeki bakır hedefe çarptırılır ve ani soğumayla katı hale geçer [10].



Şekil 1.6. Duwez ve Arkadaşları Tarafından Hızlı Soğutma Deneyle Yapıldığı Tabanca Soğutma Cihazı [11]

Turnbull ise, metalik camlarla ilgili çalışmalarında, metalik camlar ile metalik olmayan camlar (silikatlar, seramik camlar, polimerler) arasındaki benzerlikleri ortaya koyarak bu konudaki bilgi birikimine önemli katkılarda bulunmuştur [12]. Turnbull; metalik camların oluşumunda gözlenen camsı geçiş sıcaklığının, ergime sıcaklığına oranının alaşımların metalik cam oluşturma yeteneğini belirleyen bir parametre olduğunu öne sürmüştür. Buna göre camsı geçiş sıcaklığının ergime sıcaklığına oranı $T_g/T_m=2/3$ olan bir sıvının kristallenmesi zordur ve numune dar bir sıcaklık aralığında kristalize olabilir. Böyle bir sıvı düşük soğuma hızı ile kolayca soğutulabilir [2].

1980'li yıllarda, Tohoku Üniversitesi'nden (Sendai, Japonya) Inoue ve arkadaşları nadir toprak elementleri ile alüminyumlu ve demirli metalleri araştırmışlar, daha düşük hızlarda soğutma çalışması yapılırken, Ln-Al-Ni ve Ln-Al-Cu alaşımlarında olağanüstü cam oluşturma kabiliyeti saptamışlardır [2].

Son zamanlarda metalik camlarla ilgili Türkiye'de de birçok çalışma yapılmıştır:

T. Karaaslan, hızlı katılaştırılmış Al % (2,5-5-7,5)Mg alaşımlarının fiziksel, elektriksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Al-Mg alaşımları melt spinning (MS) metoduyla katılaştırılarak, alaşımın üç farklı bileşeni (Al-2,5 % Mg, Al-5 % Mg, Al75 % Mg) hazırlanmıştır. X-ışınları analizi Rigaku D-Max IIC difraktometresiyle, mikrosertlik ölçümleri Olympus Vickers mikrosertlik test cihazıyla, mikroyapı incelemesi JEOL JSM 5400 SEM ve Olympus optik mikroskopuyla incelenmiş; EDS analizi, DSC analizi yapılarak elektriksel özellikleri incelenmiş ve dört nokta D.C. elektriksel iletkenlik ölçümleri yapılmıştır [13].

S.Kerli, Al-Y-Ni amorf alaşımlarının elektriksel ve manyetik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada; daha önce üretilen Al-Y-Ni alaşımlarının elektriksel ve manyetik özellikleri incelenmiştir. $Al_{85}Y_{11}Ni_4$, $Al_{85}Y_{10}Ni_5$, $Al_{85}Y_9Ni_6$, $Al_{85}Y_5Ni_{10}$ numunelerinin elektriksel özdirençleri dört nokta DC metoduyla oda sıcaklığından 600 °C'ye kadar ölçülmüştür. Düşük sıcaklıklarda özdirençlerde belirgin bir değişme gözlenmemiştir. Magnetik özellikler, magnetometre ile ölçülmüş ve bu numunelerde herhangi bir magnetizasyon gözlenmemiştir [14].

M. Okumuş Al-Ni-Si alaşımlarının hızlı katılaştırma ile üretilmesi ve özellikleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Amorf haldeki $Al_{70}Ni_{13}Si_{17}$ alaşımlarının hızlı katılaştırılması ile elde edilen amorf ve nanokristal fazların, termal ve yapısal özellikleri DSC ve XRD ile analiz edilmiştir. DSC ile sürekli ısıtma esnasında üç ekzotermik kristallenme piki gözlenmiştir. Aktivasyon enerjileri, üç kristallenme piki için Kissinger ve Ozawa metotları kullanılarak hesaplanmıştır. Kristalleşme kinetiği, Johnson-Mehl-Avrami (JMA) analizi kullanılarak belirlenmiş ve Avrami grafiği elde edilmiştir. Hızlı katılaştırma ile üretilen şeritlere döner disk hızının etkisini gözlemek amacıyla deneyler farklı dönme hızlarında tekrarlanmıştır [15].

S. Aybar, kalın kesitli, iri ve hacimli metalik camların katılma ve kristalleşme davranışlarını incelemiştir. $Fe_{60}Co_8Mo_5Zr_{10}W_2B_{15}$ iri hacimli metalik camların katılma davranışı ve kristalleşme kinetiği incelenmiştir. Katılma sürecinde, ötektik ve peritektik reaksiyonlar tespit edilmiştir. Metalik cam oluşumu; alaşıma

sıvı halden su verme ve yarı katı halden su verme olmak üzere iki şekilde elde edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu, XRD ve termal analiz yöntemleri numunenin tanımlanması için kullanılmıştır. Alaşımın manyetik özellikleri, tavllanmış, amorf ve ilk döküldüğü hallerinin tümünde soft manyetik özelliklere sahip olduğu, ancak tavlanan numunenin diğerlerine göre daha az manyetik enerji kaybının olduğu tespit edilmiştir [16].

Ö. Oksan, Co-Fe-Ta-B esaslı iri hacimli metalik cam malzemelerin sentezlenmesi ve karakterizasyonunu incelemiştir. $Co_{43}Fe_{20}Ta_{5,5}B_{31,5}$ alaşımında Ta elementinin Nb, Ti ve Al ile kısmen ya da tamamen yer değiştirmesinin etkisi yukarıdaki bileşime sahip amorf metalik camları başarılı şekilde üretmek açısından incelenmiştir. Numunelerin, indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi, XRD, optik mikroskop ve SEM analizleri kullanılarak karakterizasyonu yapılmıştır [17].

İlk ferromanyetik amorf alaşım 1995'te Fe-(Ga-Al)-(P-C-B) çok bileşenli sisteminden elde edilmiştir [18].

Son zamanlardaki araştırmalar, plastiklik özelliği zayıf olan metalik camların bu özelliğini geliştirme yönünde yoğunlaşmaktadır.

Yüksek mekanik özellikleri, korozyon dirençleri, iletkenlikleri ve manyetik özellikleri sayesinde günümüzde önemli bir yere sahip olan metalik camlar, son yıllarda tüm dünyada araştırma konusu haline gelmiştir.

Bu çalışmada, $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının mekanik, termal, elektriksel ve manyetik özellikleri incelenecektir. Numunenin amorf yapısını tespit etmek amacıyla XRD analizleri yapılacak, tavlanan numuneler için bu analizler tekrarlanacak ve karşılaştırılacaktır. Tavlınmamış ve tavlanan numuneler için sertlik analizleri yapılacaktır. Çekme testi de yapılarak numunenin Elastisite modülü ve çekme dayanımları belirlenecektir. Elektriksel ölçümler için DC dört nokta prob tekniği kullanılarak numunenin öz direnç ölçümleri yapılacaktır. Hall ölçümleri ile malzemenin manyetik özellikleri belirlenecek, DSC analizleri ile de farklı ısıtma oranlarında öz ısı ölçümleri yapılacaktır.

2. METALİK CAM ÜRETİM METODLARI

Metalik cam üretiminde en önemli husus, ergimiş metal alaşımının hızlı bir şekilde katılaştırılmasıdır. Metalik alaşımlar; öğütme, lazer ve elektron bombardımanı gibi metodlarla da üretilebilmesine karşın, bu tür metodların atomik yapıyı, atomların örgüdeki sayılarını ve sıralarını bozduklarından dolayı tercih edilmemektedir. Başlıca metalik cam üretim metodları şunlardır:

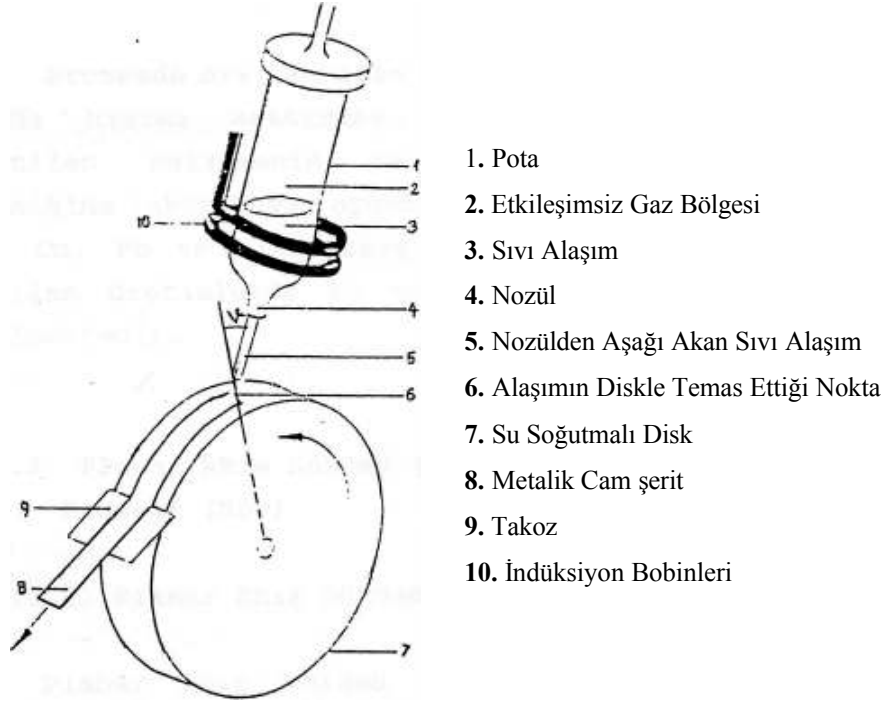
- Soğuk Dönen Disk Metodları (Sıvı Metal Savurma Metodu, Düzlemsel Akışlı Döküm Metodu)
- Sıvı Metal Çekme Metodu
- Sıvı Metal Üstten Akıtma Metodu
- Sıvı Metal Fırlatma Metodu

2.1. Soğuk Dönen Disk Metodları

Soğuk dönen disk metodları, eriyiğin disk üzerine akma mesafesine göre Sıvı Metal Savurma Metodu ve Düzlemsel Akışlı Döküm Metodu olmak üzere iki kısımda incelenir.

2.1.1. Sıvı Metal Savurma Metodu

Şekil 2.1'de sıvı metal savurma metodu şematik olarak görülmektedir. Sıvı metal savurma metodunda; eriyik pota deliğinden belirli açılarla soğuk disk üzerine püskürtülür. Sıvı metal akıtıldığı yüzeyde yayılarak soğuk yüzeyin etkisi ile ince şerit halinde soğur [19]. Bu metod ile 3 mm genişliğinde ve 10 µm kadar kalınlığa kadar şeritler üretilebilir. Soğuma hızı 10^5 - 10^7 K/s arasında değişir.

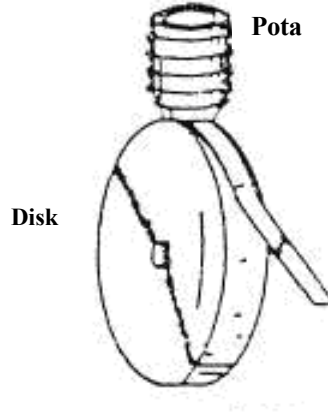


Şekil 2.1. Sıvı Metal Savurma Metodu [20].

Pota deliğinin çapı, sıvının akış hızı, diskin dönme hızı gibi etkenler üretimin kalitesini etkiler. Akış hızındaki zorluklar, potanın uç kısmının tıkanması gibi sebepler yüzünden bu metod ile yapılan üretimlerde sorunlar yaşanması ile düzlemsel akışlı döküm metodu üzerine çalışmalara başlanmıştır.

2.1.2. Düzlemsel Akışlı Döküm Metodu

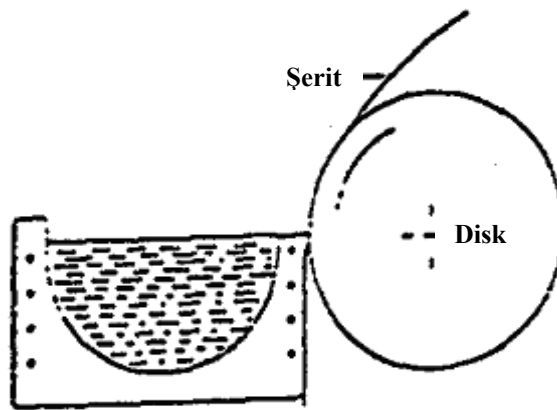
Düzlemsel akışlı döküm metodu metalik cam üretiminde en çok kullanılan metoddur. Şekil 2.2’de düzlem akışlı döküm metodunda kullanılan sistem şematik olarak görülmektedir. Yüksek frekanslı indüksiyon fırını ile elde edilen sıvı eriyik, dikdörtgen şeklindeki yarıktan disk yüzeyine akıtılır. Düzlem akışlı döküm metodunda potanın nozülü ile disk arasındaki mesafe, sıvı metal savurma metodundaki mesafeye göre oldukça azdır. Potanın disk yüzeyine yakın olması, eriyiğin akış hızını kontrol etmeye olanak sağladığından, istenen genişlikte şerit elde edilebilmektedir.



Şekil 2. 2. Düzlemsel Akışlı Döküm Metodu [21]

2.2. Sıvı Metal Çekme Metodu

Düzlem akışlı döküm metodunda eriyiğin akışı basınç uygulanarak sağlanmaktaydı. Sıvı metal çekme metodunda ise eriyiğin akması için herhangi bir gaz basıncı uygulanmamaktadır. Şekil 2.3'te sıvı metal çekme metodu şematik olarak görülmektedir. Sıvı metal çekme metodunda, düzlem akışlı döküm metodundan farklı olarak; eriyiğin akışı tamamen yerçekimi etkisi ile gerçekleşmektedir. Bu metodda şerit genişliğini sabit tutmak oldukça zordur [22].

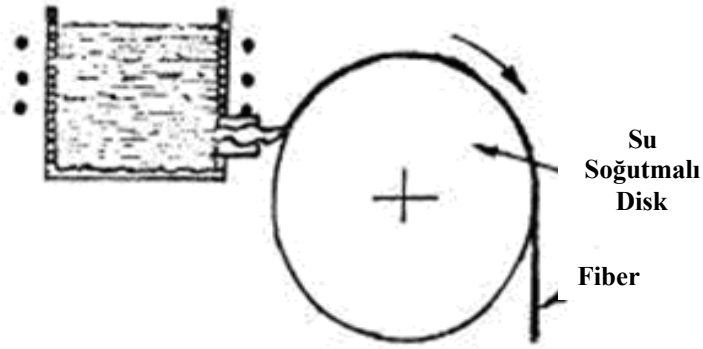


Şekil 2.3. Sıvı Metal Çekme Metodu [23]

2.3. Sıvı Metal Üstten Akıtma Metodu

Sıvı metal üstten akıtma metodunda, Şekil 2.4’de görüldüğü gibi potanın nozülü, potanın alt tarafında bulunmaktadır. Potanın hemen yanına yerleştirilen disk yüzeyine eriyiğin teması sağlanarak katılaştırma gerçekleştirilir.

Düzlem akışlı döküm metoduna kıyasla hem daha ince, hem de daha yüksek hızlarda üretim yapılabilir. Soğuma hızı disk soğumasına ve dönme hızına bağlıdır [24]. Sıvı metal üstten akıtma metodu kullanılarak, 25-1000 µm kalınlığında saçlar üretilebilir.

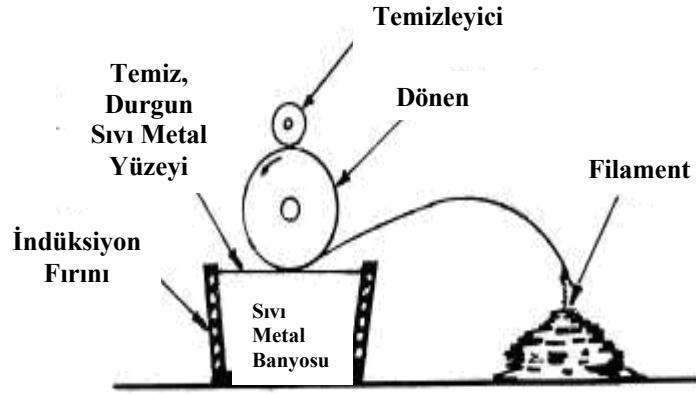


Şekil 2.4. Sıvı Metal Üstten Akıtma Metodu [24]

Sıvı metal üstten akıtma metodunda, yine indüksiyon yoluyla eritilen metal disk yüzeyine taşırılarak üretilir.

2.4. Sıvı Metal Fırlatma Metodu

Sıvı metal fırlatma metodunda, Şekil 2.5’te görüldüğü gibi sıvı metal havuzda toplanır. Eriyiğe soğuk disk yaklaştırılarak, üretim yapılır [25]. Bu yöntemin önemli bir özelliği, diskin çevresine yerleştirilen takozlar yardımıyla, şeridin sürekliliği engellenerek parçacık üretimine olanak sağlamasıdır [21]. Bu metodla, aynı kalınlıkta ve genişlikte şerit üretmek oldukça zordur [25].



Şekil 2.5. Sıvı Metal Fırlatma Metodu [21]

Bu çalışmada kullanılan $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camı düzlem akışlı döküm metodu ile üretilmiştir. Bu metod, endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan metoddur. Düzlem akışlı döküm metodu ile istenilen genişlikte numune elde edilebilmekte ve metalik cam şeritlerdeki kalınlık farkı önlenmektedir [4].

3. MEKANİK, TERMAL, ELEKTRİKSEL VE MANYETİK ÖZELLİKLER

Metalik camlar camsı yapıda olup, düşük manyetik koersiviteye, yüksek elektriksel iletkenliğe ve sıradışı bir sağlamlığa sahip önemli bir malzeme gurubudur. Yapılan araştırmalar, metalik camların birçok üstün özelliğinin ve başarılı mühendislik uygulamalarının bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu tür malzemelerin mekanik, termal, manyetik ve elektriksel özelliklerinin tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Tablo 3.1’de metalik camlarla kristal yapılu alaşımların özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.1. Metalik Camlar ile Kristal Yapılı Malzemelerin Karşılaştırılması [26]

Özellik	Metalik Cam	Kristal Alaşım
Yapı	Amorf	Kristal
Bağ	Metalik	Metalik
Akma Dayanımı	Yüksek	Düşük
Sertlik	Yüksek	Düşük
Kırılma	Sünek	Sünek
Kırılma Dayanımı	Yüksek	Yüksek
Korozyon Direnci	Yüksek	Yüksek
Optik Özellik	Opak	Opak
Elektriksel Özellik	Yüksek	Yüksek
Manyetik Özellik	Manyetik	Manyetik

3.1. Mekanik Özellikler

Mekanik özellikler; malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgiler verir. Malzemelerin mekanik özellikleri; alaşımı oluşturan elementlere, bu elementlerin dağılımına, boyutlarına ve gördükleri ısı işlemlere göre farklılıklar gösterirler.

Metalik camların mekanik özellikleri incelendiğinde oldukça sağlam, dayanıklı ve kolay işlenebilir oldukları görülebilir. Basma, kesme ve katlanma sonucu oluşabilecek plastik deformasyonlara karşı dayanıklıdırlar. Düzensiz yapıda olmalarından dolayı dislokasyon miktarı yok denecek kadar azdır. Kırılma dayanımları yüksek olan metalik camların, sertlikleri de yüksek olduğundan dolayı aşınmaya karşı da dayanıklıdırlar.

Bu çalışmada $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının Vickers sertliği ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri incelenmiştir.

3.1.1. Sertlik

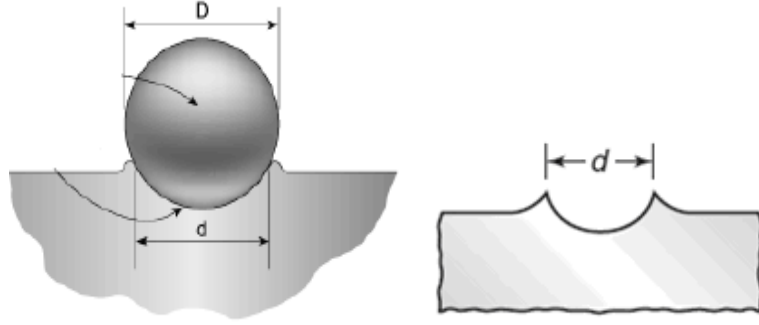
Sertlik, malzeme yüzeyinin kalıcı şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Bir malzemenin sertliği; malzemenin bileşenleri ve diğer özellikleri hakkında önemli bilgiler verir. Örneğin, sertlik ile malzemenin işlenebilirliği ters orantılıdır, malzeme ne kadar sert olursa işlenebilirliği de o derece zor olacaktır. Ayrıca sertlik ölçümü malzemeye zarar vermediğinden malzeme üzerinde başka ölçümlerin yapılmasına da olanak sağlar.

Sertlik ölçüm yöntemleri malzemenin yapısına göre (elastik, plastik...vb.) farklılık göstermektedir. Günümüz laboratuvarlarında kullanılan başlıca sertlik ölçme yöntemleri şunlardır:

- Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi
- Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi
- Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi
- Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi

3.1.1.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi

Brinell sertlik ölçme yönteminde, Şekil 3.1’de görüldüğü üzere D çapındaki bilye, belirli bir P yüküyle malzemenin yüzeyine batırılır. Bilye numune üzerinden kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin çapı (d) ölçülür. Sertlik değeri, uygulanan yükün malzeme üzerinde oluşan izin alanına bölünmesiyle elde edilir.



Şekil 3.1. Brinell Sertlik Ölçme Yönteminin Şematik Gösterimi

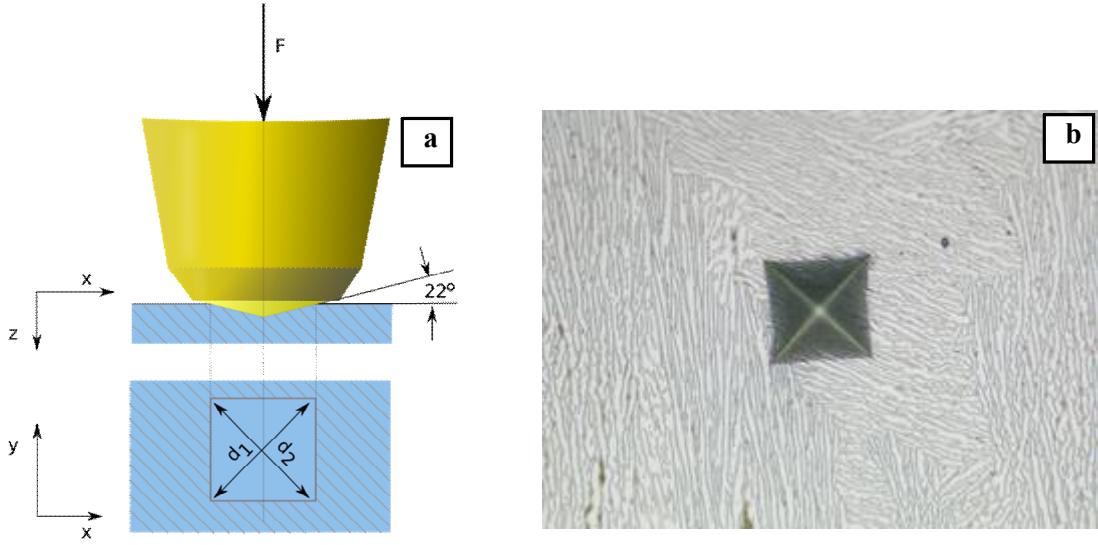
Sertlik değeri eşitlik (3.1) yardımıyla bulunur:

$$H_B = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.1)$$

Burada H_B sertlik değeri, P yük, D bilye çapı ve d iz çapıdır. Brinell sertliğinin ölçüm sonucunun birimi kgf/mm^2 olarak elde edilir.

3.1.1.2. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi

Vickers sertlik ölçme yönteminde; Şekil 3.2’de görüldüğü üzere piramit şeklindeki uç numune yüzeyine bastırılır ve meydana gelen izin köşegenleri cihaz mikroskobundan okunarak belirlenir. Numune yüzeyine uygulanan yük 10 g ile 1000 g arasında değişebilmektedir. Uç numuneye 5-30 sn arasında değişen bir sürede uygulanır. Meydana gelen izin fotoğrafı Şekil 3.2 (b)’de verildiği gibidir.



Şekil 3.2. (a) Vickers Sertlik Ölçme Yönteminin Şematik Gösterimi, (b) Batıcı Ucu Numune Yüzeyinde Bıraktığı İzin Fotoğrafı.

Vickers sertliği, eşitlik (3.2)'de verildiği gibi kuvvetin iz alanına bölünmesiyle elde edilir.

$$H_V = \frac{2F \sin(\theta / 2)}{g \cdot d^2} \quad (3.2)$$

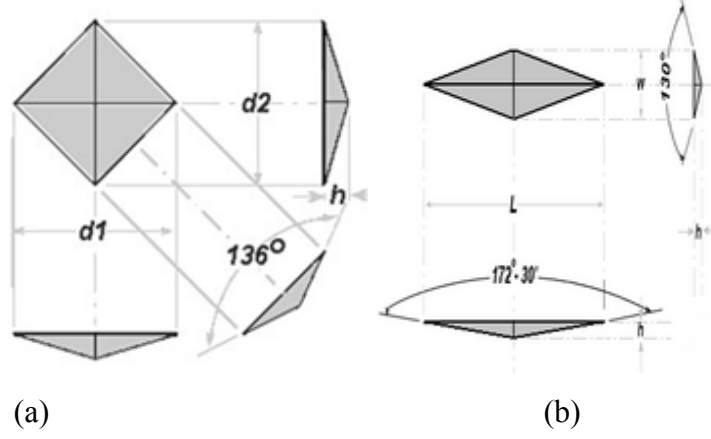
Burada F uygulanan kuvvet, g yerçekimi ivmesi, $d^2 = d_1 \cdot d_2$ izin alanı olmak üzere, Vickers ölçüm sonucunun birimi kgf/mm^2 olarak elde edilir.

Vickers sertliği ile çok ince bölge veya tabakaların bile sertliği hassas bir şekilde ölçülebildiğinden, mikrosertlik olarak da bilinir.

3.1.1.3. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi

Knoop mikrosertlik ölçümü, 1939 yılında National Bureau Standards (USA) tarafından geliştirilmiştir. Bu sertlik ölçüm yönteminde, Şekil 3.3 (b)'de görüldüğü gibi eşkenar piramit şeklinde bir elmas uç kullanılır.

Knoop mikrosertlik ölçme yöntemi, özellikle çok ince ve kırılğan malzemelerin sertliklerinin ölçülmesi amacıyla kullanılır. Piramit şeklindeki elmas uç, belirli bir süre malzeme üzerine kuvvet uygulayarak iz bırakır.



Şekil 3.3. (a) Vickers İzi Geometrisi (b) Knoop İzi Geometrisi

Vickers mikrosertlik ölçme şekli 1925 yılında İngiltere’de geliştirilmiştir. Uygulanan yükün oluşturduğu derinlik köşegenin 1/7 kadardır. Knoop ölçümü, Vickers sertlik ölçme yöntemine kıyasla daha az derin iz bırakır. Knoop sertliği H_K ile gösterilir ve aşağıdaki formülle ifade edilir.

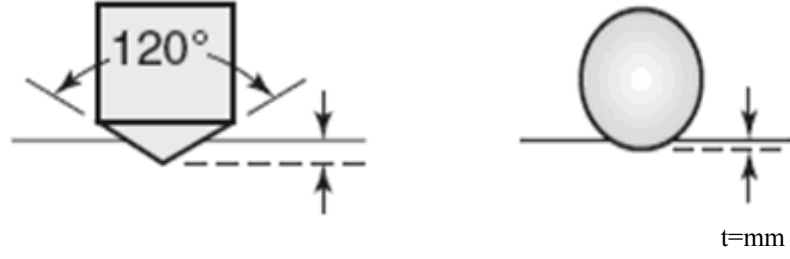
$$H_K = \frac{P}{C_p L^2} \quad (3.3)$$

Burada L numune üzerindeki izin aksinel uzunluğu, C_p düzeltme faktörü ve P ; uygulanan yük miktarıdır. Knoop sertlik ölçüm sonucunun birimi kgf/mm^2 olarak elde edilir.

3.1.1.4. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi

Rockwell sertlik ölçme yönteminde; konik bir batıcı uç ya da küresel çaplı çelik bilye kullanılır. Batıcı ucun şekli ve uygulama basıncı malzemenin cinsine göre farklılık göstermektedir. Sertlik ölçme cihazının hassasiyeti kontrol edildikten sonra sertliğini ölçmek istediğimiz malzemeye uygun ağırlık ve uç seçilir. Ön yükleme ile malzemeye temas sağlanır. Sertlik ölçümünde ön yükleme ile başlangıç noktası tespit edilmiş olur. Daha sonra cihazın ibresi sıfıra ayarlanarak kalan ağırlıklar yüklenir. Bu durumda ucun, sertliği ölçülen numuneye batması beklenir. Bir süre sonra son yüklenen ağırlık kaldırılarak sertlik değeri göstergeden okunur. Şekil

3.4'te Rockwell sertlik ölçme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. Şekildeki gibi batıcı uç numuneye batırılır ve batma derinliği ölçülür.



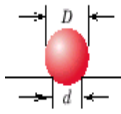
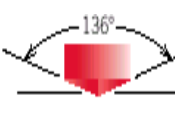
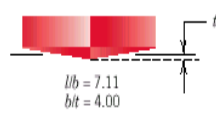
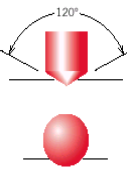


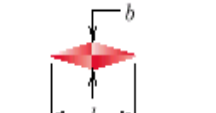
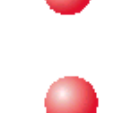
Şekil 3.4. Rockwell Sertlik Ölçme Yönteminin Şematik Gösterimi.

Tablo 3.2'de sertlik ölçme yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.2. Sertlik Ölçme Yöntemlerinin Karşılaştırılması [27]

	Brinell	Vickers	Knoop	Rockwell
Batıcı Uç	10 mm çelik veya volfram karbür küre	Elmas Piramit	Elmas Piramit	Elmas Koni 1/8 inç çapında çelik küre 1/16 inç çapında çelik küre

Batma İzinin Şekli

Yandan Görünüş				
Üstten Görünüş				
Yük	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
Sertlik Formülü	$H_B = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	$H_V = \frac{2F \sin(\theta/2)}{gd^2}$	$H_K = \frac{P}{C_p L^2}$	$\left. \begin{array}{l} R_A = \\ R_C = \\ R_D = \end{array} \right\} 100-5001$ $\left. \begin{array}{l} R_A = \\ R_C = \\ R_D = \end{array} \right\} 130-9001$

3.1.2. Çekme Testi

Çekme testi; malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyen ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlayan önemli bir özelliktir. Çekme testi; malzemenin sabit sıcaklıkta, belirli bir hızla koparıncaya kadar çekilmesi ile elde edilir. Bir başka ifadeyle, malzemenin uygulanan kuvvete karşı gösterdiği direncin ölçülmesi ile elde edilebilen mekanik bir testtir.

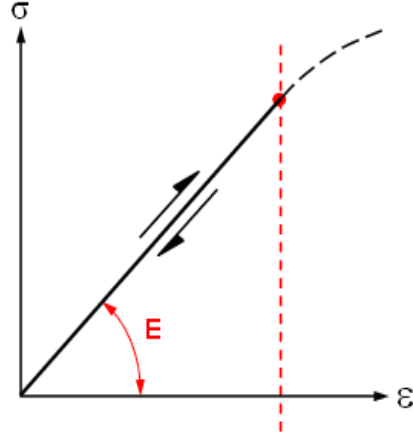
Malzemeye çekme kuvveti uygulanırken, aynı zamanda malzemenin uzaması da kaydedilir. Malzemeye uygulanan kuvvet (zor) akma noktasının altında ise, bozulma elastiktir. Bu bölgede malzeme elastik deformasyona uğramıştır. Elastik deformasyon tersinir bir olaydır. Bu bölgede küçük uzamalar olur. Yük kaldırıldığında malzeme orjinal haline döner. Malzemeye uygulanan kuvvet akma noktasını geçerse, deformasyon yani bozulma geri dönüşümsüz olur, malzeme ya kırılır ya da plastik deformasyona uğrar. Plastik bölgede deformasyon tersinir değildir ve malzemenin kırılması ile son bulur. Dislokasyon hareketleri ile atomik bağlar yeniden düzene girer.

Çekme diyagramından elde edilen bazı veriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Elastisite katsayısı
- Rezilyans
- Akma gerilmesi
- Çekme dayanımı
- Uzama
- Deformasyonun zamana bağlılığı (Anelastisite etkisi)

3.1.2.1. Elastisite Katsayısı (Young Modülü)

Thomas Young, 1810 yılında malzemelerin elastik olarak nasıl deforme olduklarını belirlemek amacıyla, elastisite katsayısı ya da Young modülü denilen önemli bir sabiti tanımlamıştır [28]. Şekil 3.5 zor ile zorlanma arasındaki ilişkiden elde edilen elastisite katsayısının tespiti hakkında bilgi vermektedir. E ile gösterilen Young modülü,



Şekil 3.5. Elastisite Modülü [28]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.4)$$

ile verilir. Buradaki σ gerilim ve ϵ birim uzamadır. Hook yasası olarak da bilinen bu bağıntıdaki çekme elastisite modülüne **Young modülü** denir.

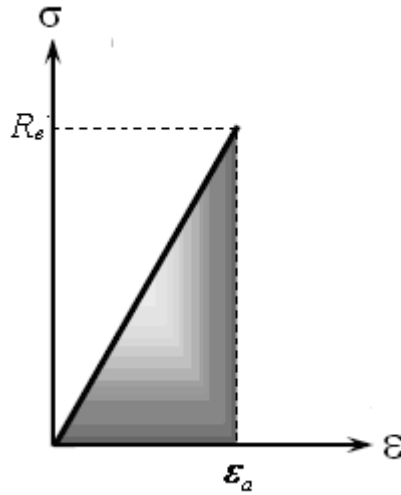
Elastisite katsayısı, metaller ve alaşımlarının atomları arasındaki bağ gerilmeleriyle ilgilidir ve malzemenin birim uzamasındaki gerilme miktarı olarak tanımlamak mümkündür. Yüksek elastiklik modülüne sahip metallerin eski hallerine dönmeleri zordur. Bir malzemenin elastisite katsayısı arttıkça, esnekliği azalır. Malzemenin elastisite modülü sıcaklıkla ters orantılıdır. Bazı malzemelerin elastiklik modülleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Bazı Metallerin Oda Sıcaklığındaki Elastiklik Modülleri [29]

Malzeme	Elastiklik Modülü (kg/mm²)
Alüminyum	7×10^3
Berilyum	26×10^3
Kobalt	21×10^3
Bakır	11×10^3
Demir	21×10^3
Kurşun	$1,8 \times 10^3$
Magnezyum	$4,5 \times 10^3$
Molibden	33×10^3
Nikel	21×10^3

3.1.2.2. Rezilyans

Malzemenin elastik şekil değiştirmesi esnasında absorbe ettiği enerjiyi, şekil değişimine neden olan kuvvetin kaldırılması ile geri verme özelliğine rezilyans denir. Şekil 3.6'daki elastik bölgenin altında kalan alan, malzemenin absorbe ettiği enerji miktarı olarak tanımlanır.



Şekil 3.6. Gerilme, Gerilme ve Rezilyans İlişkisi

U_R malzemenin absorbe ettiği enerji, yani rezilyans olup

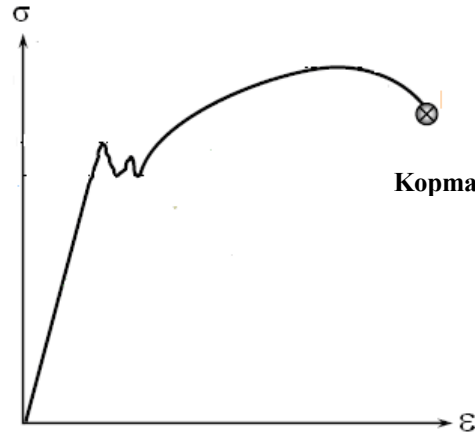
$$U_R = \frac{R_e \cdot \varepsilon_a}{2} = \frac{R_e^2}{2E} \quad (3.5)$$

ile verilir. Buradaki R_e maksimum elastik gerilme; ε_a elastik bölgedeki maksimum birim uzama ve E Elastisite katsayısıdır.

3.1.2.3. Akma Gerilmesi

Malzeme üzerine uygulanan çekme kuvveti sabit olduğu halde, şekil değişiminin önemli derecede arttığı ve çekme diyagramının düzensizlik gösterdiği gerilme değerine akma gerilmesi denir.

Şekil 3.7'de özel akma gösteren malzemelere ait gerilme (σ)-birim uzama (ε) diyagramı bulunmaktadır. Bazı malzemelerde, özellikle düşük karbonlu bir çelikte bir üst akma bir de alt akma noktası bulunur. Akma gerilmesi olarak en alt akma gerilmesi esas alınır. Bu bölgedeki iniş çıkışlar dislokasyonların ve engellemelerin aşılması sebebiyledir.



Şekil 3.7. Özel Akma Gösteren Malzemelerde Mühendislik Gerilmesi [29]

Malzemelerin akma ve çekme mukavemetleri önceden yapılan ısıl işlem, içlerindeki safsızlık seviyeleri ve ısıya maruz kalmaları sebebiyle değişir. Bu değişikliğin sebebi de malzeme içindeki dislokasyonlardır.

3.1.2.4. Çekme Dayanımı

Çekme diyagramındaki maksimum gerilme değerine çekme dayanımı adı verilir. Bu değerden sonra, malzeme kopuncaya kadar uzamaya devam ederken gerilme düşer veya sabit kalır. Bu gerilmeye kadar malzemenin kesiti her tarafta aynı oranda azalırken, bu gerilmeden sonra malzeme belli bir bölgede büzülür ve kopar. Tablo 3.4'te farklı elementler için çekme mukavemetleri verilmiştir.

Tablo 3.4. Farklı Malzemelerin Çekme Mukavemetleri [30]

Element	Çekme Mukavemeti (MPa)
Alüminyum	40-50
Bakır	210
Altın	100
Demir	350
Nikel	140-195
Gümüş	170
Titanyum	240-370

3.1.2.5. Uzama (%)

Malzemeye çekme testi uygulandığında, uygulanan kuvvetle birlikte uzama miktarının arttığı görülür. Yüzde uzama, malzemenin ortalama uzama miktarının, ilk uzunluğuna oranının yüzdesi olarak tanımlanır. Malzemelerin yüzde uzamaları,

$$Uzama (\%) = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (3.6)$$

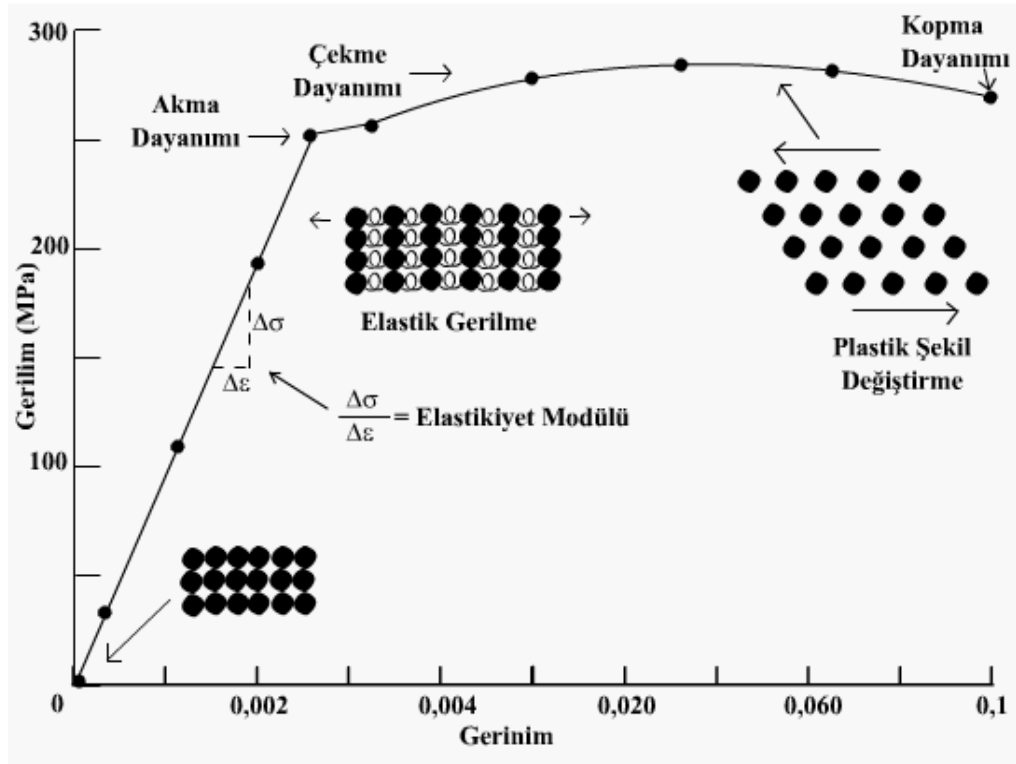
ifadesinden hesaplanır. Buradaki $\Delta l = l - l_0$ uzama miktarı, l_0 malzemenin ilk uzunluğudur.

3.1.2.6. Elastik Deformasyonun Zamana Bağıllığı (Anelastisite Etkisi)

Elastik deformasyonun zamana bağıllığı anelastisite olarak tanımlanır. Genellikle metalik malzemeler için elastik deformasyonun zamandan bağımsız olduğu kabul edilir. Oysa elastik deformasyon zamanla yakından ilişkilidir. Malzemeye ilk yükleme uygulandığında yükte gevşeme olur. Malzemenin bu davranışına anelastisite denir.

Metallerde anelastisite etkisi, normalde çok küçük olmakla birlikte plastikler için bu etki çok önemlidir. Buna visko-elastik davranış denir.

Şekil 3.8'de çelik bir numune için çekme diyagramında malzeme için elde edilebilecek bilgiler şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3. 8. Çelik Bir Numune için Gerilmenin Birim Uzamayla Değişimi [31]

3.2. Termal Özellikler

Metalik malzemelerde iyonlar sıcaklığın artmasıyla buldukları denge pozisyonunda titreşirler. Titreşim genliğinin artmasıyla da iç enerjide artış gözlenir. Sıcaklığın artması aynı zamanda elektronların daha yüksek enerji seviyelerine çıkmasına neden olur, dolayısıyla iç enerji yine artar. Yarıiletken ve yalıtkanlarda, yasak enerji bölgesinin bulunması az sayıda elektronu daha yüksek enerji seviyesine çıkaracağından, iç enerjideki artış ihmal edilebilecek seviyededir.

3.2.1. Isı Kapasitesi ve Öz ısı

Bir Q ısısının bir cisme verildiğini ve bunun bir ΔT sıcaklık farkının ortaya çıkmasına neden olduğunu farz edelim. Cisme verilen ısı, cisimde meydana gelen sıcaklık değişimi oranına ısı kapasitesi denir, büyük 'C' harfi ile gösterilir, birimi cal/K'dir:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (3.7)$$

Isı kapasitesi iki şekilde ölçülür. Birincisi sabit basınç altında, ikincisi sabit hacim altında yapılan ölçümlerdir ve

$$C_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_p \quad C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (3.8)$$

şeklinde gösterilirler. Deneysel çalışmalarda malzemelerin hacimlerini sabit tutmak mümkün olamayacağı için ısı kapasitesi ölçümleri sabit basınç altında, teorik çalışmalarda ise sabit hacim altında incelenir.

Bir katıya sıcaklığını arttırmak için verilmesi gereken Kelvin başına ısı miktarına öz ısı denir. Öz ısı küçük 'c' harfi ile gösterilir. Birimi cal /gr K' dir.

Genellikle, sabit basınç altında ölçülen özısı değerleri, sabit hacim altında ölçülen değerlerden farklıdır. Katı ve sıvılarda, bu iki değer arasındaki fark, genellikle %1-3 mertebesinde dir. Gazların ise sabit basınç altındaki ısı kapasitesi değerleri ile sabit hacim altındaki ısı kapasitesi değerleri arasında büyük farklar vardır.

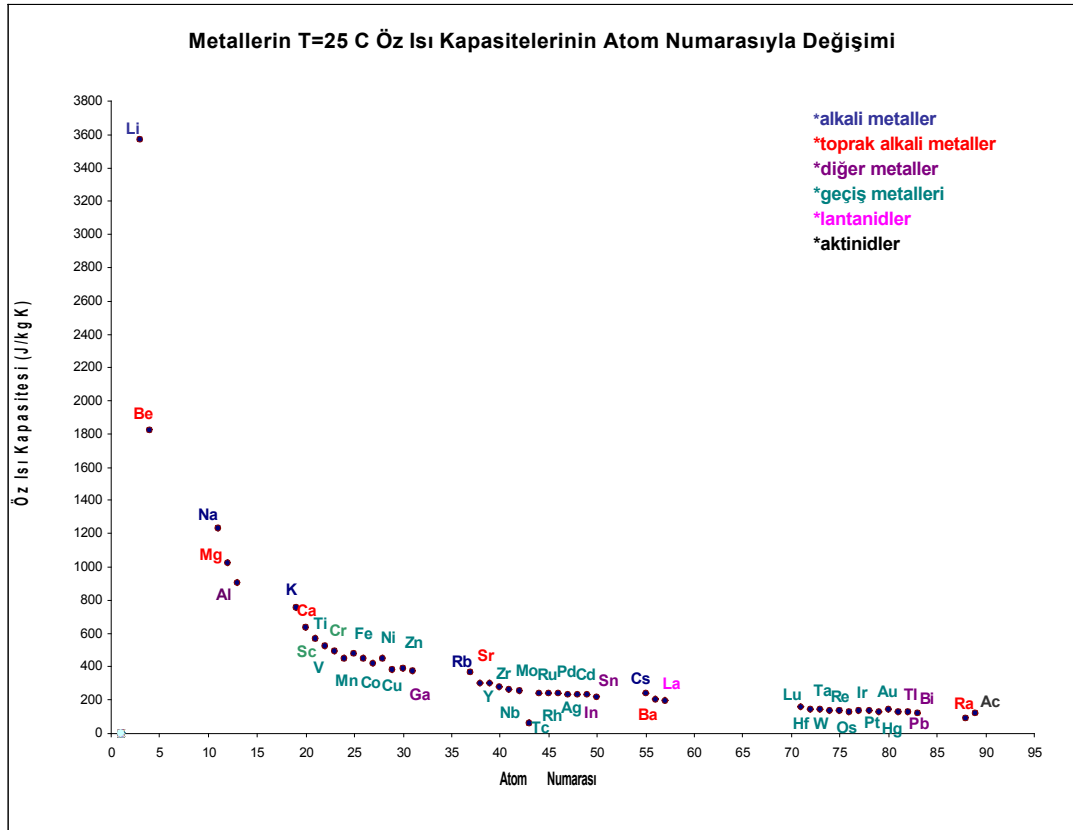
Herhangi bir sıcaklıkta bir maddenin gerçek öz ısısını, sonsuz küçük bir dT sıcaklık değişimini göz önüne alırsak ve bu sıcaklık yükselmesini ortaya çıkarmak için gerekli ısıyı dQ ile gösterirsek;

$$dQ = m \cdot c \cdot dt \quad (3.9)$$

olur. Bu ifadenin integrali alındığında Q ;

$$Q = m \int_{t_1}^{t_2} c dt \quad (3.10)$$

şeklinde elde edilir. Genel olarak öz ısı (c) sıcaklığın bir fonksiyonudur. Şekil 3.9'da metallerin oda sıcaklığında öz ısılarının atom numarasıyla değişimi verilmiştir.



Şekil 3.9. Metallerin Oda Sıcaklığında (T=25 °C) Öz Isılarının Atom Numarasıyla Değişiminin İncelenmesi

3.2.2. Isı Kapasitesi Modelleri

Malzemelerin ısı kapasitelerini hesaplayabilmek için önerilen modeller sırasıyla Klasik, Einstein ve Debye modelleridir.

3.2.2.1. Klasik Model

Katı içerisindeki atomlar buldukları yapıya harmonik bir kuvvetle bağlıdır. Katı ısıtıldığı zaman atomlar 'E' enerjisi ile konumları etrafında titreşirler. Örgünün toplam enerjisi;

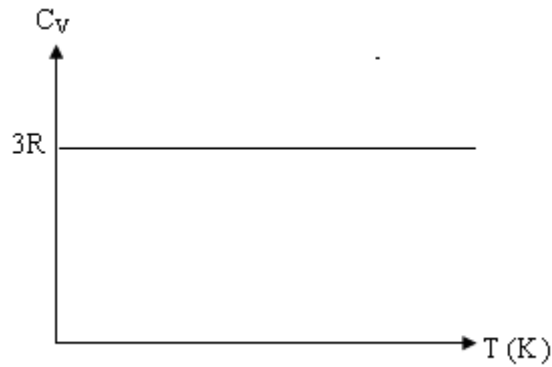
$$U = 3N\langle E \rangle = 3NkT \quad (3.11)$$

ile verilir. Sabit hacimdeki gibi ısı kapasitesi ise;

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3Nk = 3R \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki $Nk = R$ olup ideal gaz sabitidir.

Klasik model ile deneysel veriler yüksek sıcaklık bölgesinde uyuşmakta, ancak düşük sıcaklıklarda uyuşmamaktadır. Klasik modelde elde edilen ısı kapasitesi sabit ve sıcaklıktan bağımsız olup Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Klasik Modelde Isı Kapasitesinin Sıcaklıkla Değişimi

3.2.2.2. Einstein Modeli

Klasik modelin eksik olan yanı, harmonik osilatörün enerji hallerini sürekli kabul etmesidir. Bu hesaplamalarda kuantum teorisine uymak için faz uzayındaki integraller yerine osilatörün mücade edilen enerji halleri üzerindeki toplamların alınması gerekir. Bir lineer harmonik osilatörün n . hallerinin enerjisi [32-34,36-37];

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega \quad (3.13)$$

ile verilir. Einstein bütün osilatörlerin aynı ω_0 frekansında titreştiklerini kabul etmiştir. Termal enerjiye bağlı ısı kapasitesi ifadesini;

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3Nk \left(\frac{\omega_0 \hbar}{kT} \right)^2 \frac{e^{-\omega_0 \hbar / kT}}{\left(e^{-\omega_0 \hbar / kT} - 1 \right)^2} \quad (3.14)$$

olarak elde etmiştir.

Einstein sıcaklığı olarak;

$$kQ_E = \omega_0 \hbar$$

bağıntısını sağlayan Q_E değerinin tanımı uygun olmaktadır. Bu durumda örgünün ısı kapasitesi [34-36, 39];

$$C_V = 3Nk \left(\frac{Q_E}{T} \right)^2 \frac{e^{-\frac{Q_E}{T}}}{\left(e^{-\frac{Q_E}{T}} - 1 \right)^2} \quad (3.15)$$

şeklinde bulunur.

Yüksek sıcaklıklarda $T \gg Q_E$ ise $e^{-\frac{Q_E}{T}} \approx 1 + \frac{Q_E}{T}$ alınabileceğinden;

$$C_V \approx 3Nk \left(\frac{Q_E}{T} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{Q_E}{T} \right)^2} = 3Nk \quad (3.16)$$

ifadesi elde edilir. Bu sonuç, klasik sonuç ile aynıdır.

Düşük sıcaklıklarda $T \ll Q_E$;

$$e^{\frac{Q_E}{T}} \gg 1 \text{ ve } C_V \approx 3Nk \left(\frac{Q_E}{T} \right)^2 e^{-Q_E/T}$$

şeklinde ifade edilir. Son bağıntı $T \rightarrow 0$ yaklaşıklı Klasik modele göre gerçek katıların durumunu belirlemede bir ilerleme demektir. Bu modelde düşük sıcaklıklarda C_V 'nin T sıcaklığına üstel bağlandığını gösterip gerçek yalıtkan katılarda geçerli olan T^3 kanununu vermediğinden dolayı doğru değildir. Bu sonuç teorik modelin bir miktar daha geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.2.2.3. Debye Modeli

Bu modelde N atomlu bir örgüde $3N$ normal titreşim modu bulunduğu esasına dayanmaktadır. Bu halde lineer zincirdeki atomik yer değiştirmeler ayrı ayrı göz önüne alınmayıp, sistem bütün olarak normal mod problemi şeklinde incelenecektir. Debye, Einstein modelindeki tek harmonik osilatör frekansı yerine; sıfırdan bir maksimum veya x_D kesilme frekansına kadar olan frekans aralığını göz önüne almıştır.

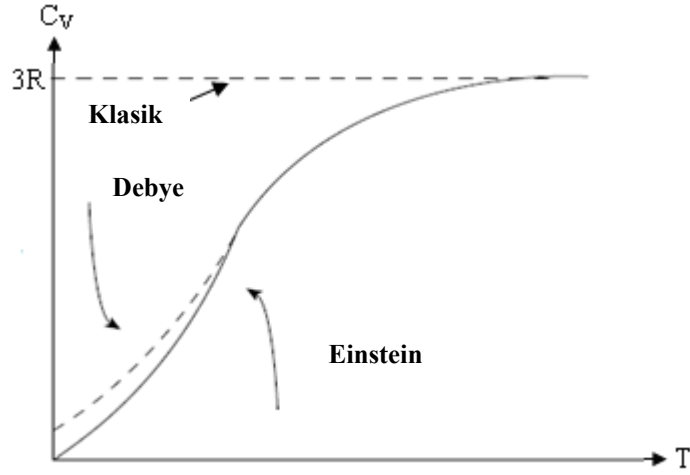
Debye ısı kapasitesi ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$C_V = 9Nk \left(\frac{T}{Q_D} \right)^3 \int_0^{Q_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (3.17)$$

$T \gg Q_D$ olacak kadar yüksek sıcaklıklarda $e^x \approx 1 + x$ alınabilir. Dolayısıyla C_V ifadesi:

$$C_V = 9Nk \left(\frac{T}{Q_D} \right)^3 \int_0^{Q_D/T} \frac{x^4(x+1)}{x^2} dx = 3N \quad (3.18)$$

elde edilir. Isı kapasitesi için geliştirilmiş olan Klasik, Einstein ve Debye modellerinin şematik olarak karşılaştırılması Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Klasik, Einstein ve Debye Isı Kapasitesi Modellerinin Karşılaştırılması [39]

$T \ll Q_D$ olan düşük sıcaklıklarda enerji ifadesinin üst limiti ‘ ∞ ’ alınabilir [40].

$$C_V = 9Nk \left(\frac{T}{Q_D} \right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx \Leftrightarrow \left[\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15} \right]$$

Bundan hareketle enerji denkleminiz; $U = \frac{9}{8}NkQ_D + \frac{3}{5}Nk\pi^4 \frac{T^4}{Q_D^3}$ olur.

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{12}{5}Nk\pi^4 \left[\frac{T}{Q_D} \right]^3 \quad (3.19)$$

elde edilir. Bu bağıntı ‘Debye’nin T^3 kanunu’ adını alır ve yalıtkan katılarda çok düşük sıcaklıklarda elde edilen deneysel sonuçları doğrular.

3.2.3. DSC ile Öz Isı (C_p) Ölçüm Metodları

DSC ile öz ısı ölçümü sürekli modda ve basamaklı modda olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır.

- Sürekli Modda C_p Ölçümü (Referanssız-Sürekli Modda C_p Ölçümü, Referanslı-Sürekli Modda C_p Ölçümü)
- Basamaklı Modda C_p Ölçümü (Referanssız-Basamaklı Modda C_p Ölçümü, Referanslı-Basamaklı Modda C_p Ölçümü)

3.2.3.1. Sürekli Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü

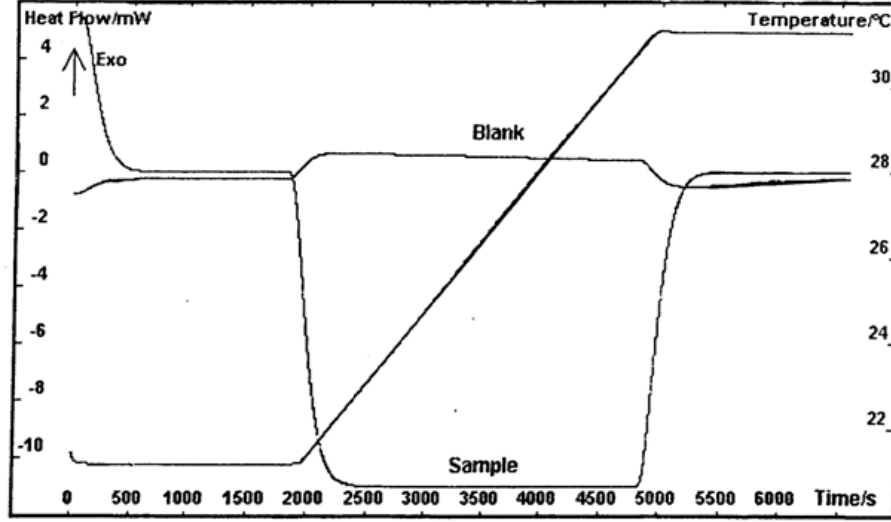
Sürekli ısıtma modu ile C_p ölçümü, DSC ile öz ısı elde edilmesinde en çok tercih edilen basit ve hızlı bir methoddur. Bu methodda; numuneli ve numunesiz olarak alınan veriler arasındaki fark analiz edilir.

3.2.3.1.1. Referanssız - Sürekli Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü

Referans madde kullanmadan sürekli modda C_p ölçümü yapabilmek için Şekil 3.12'de görüldüğü gibi deneysel şartları hemen hemen aynı olan iki ayrı ölçüm alınır [41];

1. DSC nin her iki kabı da BOŞ olan ölçüm,
2. DSC nin bir kabı BOŞ, diğerinde NUMUNE olan ölçüm.

Bu iki sinyal arasındaki fark, numunenin öz ısı ile orantılıdır. Bu fark, DSC eğrilerinin kalibrasyonu ile direk olarak termal güce dönüştürülür.



Şekil 3.12. Referanssız - Sürekli Modda Isı Akışı - Sıcaklık Verileri [41]

Bu metod, referans kullanmadan her bir sıcaklık değeri için direk olarak C_p değerini belirleme imkanı sağlar. Metod için önerilen formül,

$$C_p(T)_{Num} = \frac{HF_{Num} - HF_{Boş}}{Hassasiyet(T) \cdot Kütle_{Num} \cdot \frac{dT}{dt}} \quad (3.20)$$

şeklinde dir. Buradaki $C_p(T)_{Num}$ numunenin ilgili sıcaklıktaki öz ısısı, HF_{Num} numunenin ısı akışı değeri, $HF_{Boş}$ boş haznenin ısı akışı değeri, $Hassasiyet(T)$ DSC cihazının ilgili sıcaklıktaki hassasiyet katsayısı, $Kütle_{Num}$ numunenin kütlesi ve $\frac{dT}{dt}$ ise ısıtma hızıdır (β).

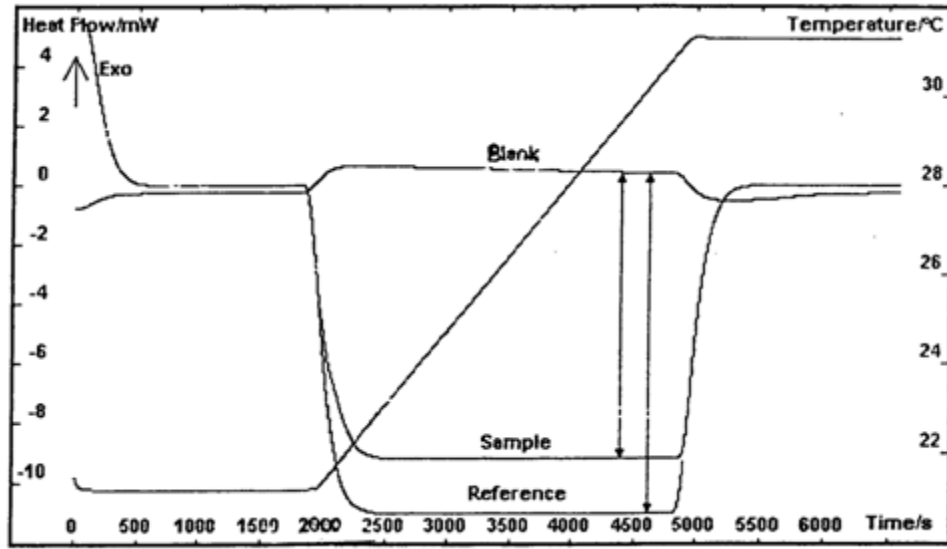
3.2.3.1.2. Referanslı - Sürekli Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü

Referans numune kullanarak sürekli modda C_p ölçüm metodu standart numunelerle kalibre edilen cihazlar için geçerlidir. Bu tür kalibrasyonlar erime ve faz geçişi gibi termal olaylar için çok daha uygundur. SETARAM DSC 131 cihazı standart numunelerle kalibre edilen bir cihazdır. Malzemelerin ısı kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla kalibrasyon yapılırken öz ısısı bilinen standart numuneler (ör: safır)

kullanılır. Bu metodla öz ısı analizi yapabilmek için Şekil 3.13'te gösterildiği gibi deneysel şartları hemen hemen aynı olan üç ayrı ölçüm alınır [41]:

1. DSC nin her iki kabı da BOŞ olan ölçüm,
2. DSC nin bir kabı BOŞ, diğesinde NUMUNE olan ölçüm,
3. DSC nin bir kabı BOŞ, diğesinde öz ısısı bilinen referans (safır) numunenin olduğu ölçüm.

Bütün ölçümlerde T_i ilk sıcaklığından T_f son sıcaklığına aynı β ısıtma hızıyla çıkılır.



Şekil 3.13. Referanslı - Sürekli Modda Isı Akışı - Sıcaklık Verileri [41]

Referanslı - Sürekli Modda C_p Ölçümü metodunda numunenin öz ısısı,

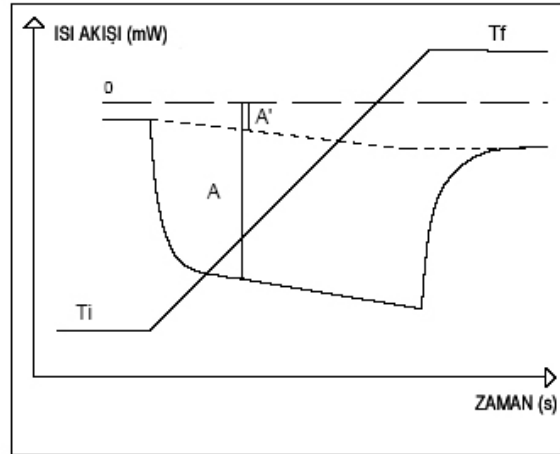
$$C_p(T)_{\text{Num}} = \frac{HF_{\text{Num}} - HF_{\text{Boş}}}{HF_{\text{Ref}} - HF_{\text{Boş}}} \cdot \frac{Kütle_{\text{Ref}}}{Kütle_{\text{Num}}} \cdot C_{p\text{Ref}}(T) \quad (3.21)$$

eşitliğinden elde edilmektedir. Buradaki $C_p(T)_{\text{Num}}$ numunenin ilgili sıcaklıktaki öz ısısı, HF_{Num} numunenin ısı akışı değeri, $HF_{\text{Boş}}$ boş haznenin ısı akışı değeri, HF_{Ref} referans olarak kullanılan maddenin ısı akışı değeri, $Kütle_{\text{Ref}}$ referans maddenin kütlesi, $Kütle_{\text{Num}}$ numunenin kütlesidir. $C_{p\text{Ref}}(T)$ ise referans maddenin (safır) öz ısı değeridir.

Analizlerde dikkat edilmesi gereken noktalar şunlardır:

- 1) Genlikler rastgele birimlerle gösterilebilirler.
- 2) Bütün ölçümlerde aynı ısıtma hızı kullanıldığı sürece ısıtma hızının sonucu etkilemeyeceği açıktır.
- 3) Kararlı bir sinyal elde etmek için ısıtma öncesi ve sonrası eş-ısılı bölgelerde görülen süreler yeterince uzun tutulmalıdır.
- 4) C_p formülü uygulanmadan önce, yazılım her bir eğri için düzeltme yapmaktadır.

Eğrilerde yapılacak olan düzeltmeler şu şekildedir: Pratikte, eş-ısılı bölgelerde; eğriler ideal olarak T_i ve T_f sıcaklıklarına Şekil 3.14'te olduğu gibi tam olarak oturmazlar. Bu sebepten dolayı C_p yazılımı önce deneysel eğrileri düzeltmektedir. C_p formülü uygulanmadan önce orijinal A genliğini $A-A'$ farkı dikkate alınarak eğrilerde düzeltme yapılır. Şekil 3.14'te noktalı olarak gösterilen bu düzeltme, eş-ısılı bölgeler ve ramp kullanılarak, yazılım tarafından yapılmaktadır [41].



Şekil 3.14. Referanslı - Sürekli Modda Eğrilerde Düzeltme [41]

3.2.3.2. Basamaklı Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü

Öz ısı, basamaklı ısıtma modunda da ölçülebilir. Bu metodla; verilen bir sıcaklık basamağında ısıtılan numunenin termal etkisi integre edilir, numunenin ilgili sıcaklık basamağına ulaşip dengeye ulaşması beklenir. Bu durum metodun hassasiyetini artırır.

Basamaklı modda C_p ölçümü için yapılan iki ayrı metod vardır:

1. Referanssız - Basamaklı Modda C_p Ölçüm Metodu,
2. Referanslı - Basamaklı Modda C_p Ölçüm Metodu.

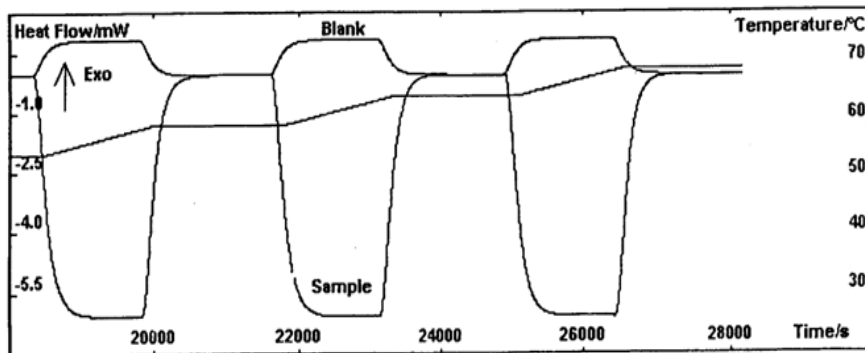
Bu metodları kısaca inceleyelim.

3.2.3.2.1. Referanssız - Basamaklı Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü

Bu metodla DSC'lerle öz ısı ölçümü yapabilmek için Şekil 3.15'te gösterildiği gibi deneysel şartları hemen hemen aynı olan iki ayrı ölçüm alınır [41]:

1. DSC nin her iki kabı da BOŞ olan ölçüm
2. DSC nin bir kabı BOŞ, diğesinde NUMUNE olan ölçüm

İki sinyal arasındaki fark numunenin öz ısısı ile orantılıdır. Bu fark, DSC'nin kalibrasyon eğrisiyle direk olarak termal güce dönüştürülür.



Şekil 3.15. Referanssız - Basamaklı Modda Isı Akışı - Sıcaklık Verileri [41]

Bu metod, safir gibi bir referans madde kullanmadan her bir sıcaklık değeri için direk olarak C_p değerini belirleme imkanı sağlar. Bu metotta kullanılan formül,

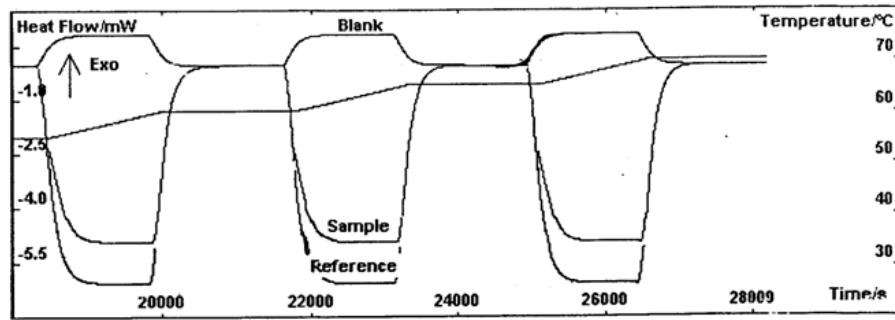
$$C_p (T_i \rightarrow T_{i+1}) = \frac{\int_{T_i}^{T_{i+1}} HF_{Num} dT - \int_{T_i}^{T_{i+1}} HF_{Boş} dT}{Hassasiyet \left[\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right] Kütlesel_{Num} (T_{i+1} - T_i)} \quad (3.22)$$

ile verilir.

3.2.3.2.2. Referanslı - Basamaklı Modda Öz Isı (C_p) Ölçümü

Bu metod standart numunelerle kalibre edilen cihazlar için geçerlidir. Ölçüm yapabilmek için kalibrantın öz ısısı bilinmelidir. Ölçüm yapılabilmesi amacıyla Şekil 3.16'da gösterildiği gibi deneysel şartları hemen hemen aynı olan üç ayrı ölçüm alınır [41]:

1. DSC nin her iki kabı da BOŞ olan ölçüm,
2. DSC nin bir kabı BOŞ, diğesinde NUMUNE olan ölçüm,
3. DSC nin bir kabı BOŞ, diğesinde ısı kapasitesi bilinen KALİBRANT'ın olduğu ölçüm.



Şekil 3.16. Referanslı - Basamaklı Modda Isı Akışı - Sıcaklık Verileri [41]

Her bir sıcaklık artışında ortalama sıcaklık için ölçülen ortalama öz ısı,

$$C_{Port}(T_i \rightarrow T_{i+1}) = \frac{\int_{T_i}^{T_{i+1}} HF_{Num} dT - \int_{T_i}^{T_{i+1}} HF_{Bos} dT}{\int_{T_i}^{T_{i+1}} HF_{Ref} dT - \int_{T_i}^{T_{i+1}} HF_{Bos} dT} \cdot \frac{K\u00fctle_{Ref}}{K\u00fctle_{Num}} \cdot C_{P,Ref} \left[\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right] \quad (3.23)$$

kullanılarak elde edilir.

Buradaki HF_{Num} numunenin ısı akışı değeri, $HF_{Boş}$ boş haznenin ısı akışı değeri, HF_{Ref} referans olarak kullanılan maddenin ısı akışı değeri olup birimleri mW cinsindedir. $K\u00fctle_{Ref}$ referans maddenin k\u00fctlesi, $K\u00fctle_{Num}$ numunenin k\u00fctlesidir. $C_{pRef}(T)$ ise referans maddenin (safır) \u00f6z ısı değeridir.

Bu tez \u00e7alışmasında 30 μ m kalınlığındaki $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının DSC analizleri yapılmıştır. Referanslı - S\u00fcrekli Modda C_p \u00d6l\u00fcm\u00fc Metodu ile eşitlik (4.3)'ten \u00f6z ısı elde edilmiştir.

3.3. Elektriksel \u00d6zellikler

Metaller kristal yapılı olduklarından; Schr\u00f6dinger eşitliğinin \u00e7\u00f6z\u00fclmesiyle elektronların enerji bantları hesaplanabilir. B\u00f6ylece metallerin elektriksel \u00f6zdiren\u00e7leri hakkında bilgi edinilebilir [42]. Ancak bu durum, amorf yapıya sahip metalik camlar i\u00e7in ge\u00e7erli değildir. \u00c7\u00fcnk\u00fc d\u00fczenli bir yapıya sahip olmayan metalik camlar i\u00e7in Schr\u00f6dinger denkleminin genel bir \u00e7\u00f6z\u00fcm ifadesi yoktur.

Metalik camların elektriksel \u00f6zdiren\u00e7lerinin sıcakla değişimi, sıvı metallerinki ile benzerlik g\u00f6stermektedir. Genel olarak metalik camların elektriksel iletkenliği, kristal yapılı malzemelere oranla daha d\u00fcş\u00fck\u00fct\u00fcr.

3.3.1. Elektriksel İletkenlik

Elektriksel iletkenlik bir iletken malzemeye uygulanan elektriksel alan etkisinde y\u00fc taşıyıcılarının uzak mesafeli hareketleri sonucu oluşur. Metallerde serbest elektronlar eksi kutuptan artı kutba doğru hareket eden negatif y\u00fc taşıyıcılarıdır. Genelde sıvı eriyiklerde g\u00f6r\u00fclen iyonsal iletkenlikte ise pozitif y\u00fckl\u00fc anyonlar ve negatif katyonlar (bunlar elektron değil molek\u00fcl veya atomdur) elektriksel alan

etkisi altında ortamda hareket ederek iletkenliği sağlarlar. l (cm) boyunda A (cm²) kesitli iletken için Ohm kanunu gereği;

$$V = I \times R \quad (3.24)$$

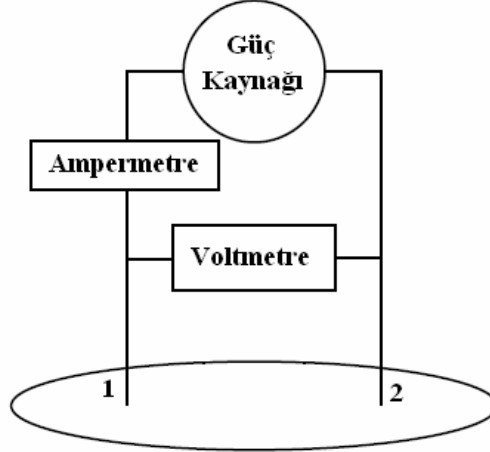
olarak verilir. Burada gerilim V (volt) ve akım I (amper) birbirlerine bir orantı katsayısı direnç R (ohm) ile bağlıdır. Ve ortamın iletkenliğini belirler. Burada;

$$R = \rho \cdot l/A \quad (3.25)$$

olur. ρ ortama göre değişen bir katsayıdır. Birimi $\Omega \cdot \text{cm}$ 'dir.

3.3.1.1. DC İki Nokta Yöntemi

Elektriksel ölçüm metodlarından biri, DC iki nokta ölçüm yöntemidir. Şekil 3.17'de görüldüğü gibi problar hem akım hem de gerilim probu olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3. 17. DC İki Nokta Ölçüm Yönteminin Şematik Gösterimi

Burada toplam direnç;

$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_c + 2R_{sp} + R_s \quad (3.26)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada R_c metal probun kontak direnci, R_{sp} prob altındaki yüzey direnci, R_s iletken direncidir.

3.3.1.2. DC Dört Nokta Yöntemi

DC Dört nokta yöntemi, öz direnç ölçmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. 1916 yılında Wenner tarafından geliştirilmiştir. 1954 yılında ise Valdes yarıiletken levhaların öz dirençlerini ölçmek için kullanmıştır [42].

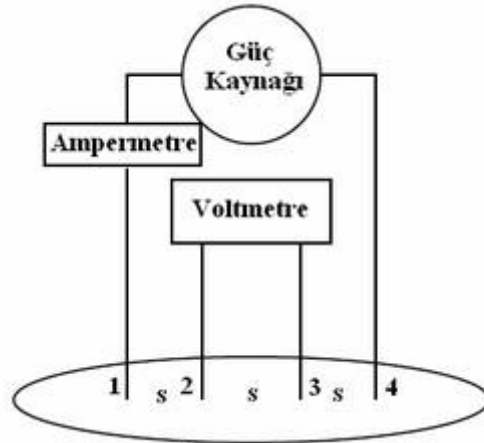
Klasik düzenlemesi ise şu şekilde ifade edilebilir: Doğrusal bir düzlem üzerinde 4 prob eşit aralıklarla yerleştirilir ve düzlem üzerinde aynı hizada bulunmak şartıyla; iki dış prob (1. ve 4.) üzerinden akım verilir ve iki iç prob (2. ve 3.) aracılığıyla elektrik potansiyeli ölçülür.

DC Dört nokta yönteminde malzeme geometrisinin bilinmesi de büyük önem taşır. Test edilen yapıların büyüklüğü ve prob arası mesafenin, ölçülen akım ve elektriksel potansiyeli nasıl etkilediğini bilmek önemlidir.

Şekil 3.18’de görüldüğü üzere, dış problardan bir I akımı geçirildiğinde öz direnç;

$$\rho = (V/I)WCF \quad (3.27)$$

Burada CF düzeltme faktörü (sabit), W ise kalınlık olarak verilmiştir.



Şekil 3. 18. DC Dört Nokta Ölçüm Yönteminin Şematik Gösterimi

$$\rho = \frac{\pi}{\ln(2)} W \left(\frac{V}{I} \right) = 4,532 \left(\frac{V}{I} \right) W \quad (3.28)$$

Ölçümler; dış problemlere akım verilip, iç problemlardan voltajın okunmasıyla elde edilir.

$$R = 4,532 \left(\frac{V}{I} \right) \quad (3.29)$$

$$\rho = W.R \quad (3.30)$$

Eşitlik (3.29) ve (3.30) kullanılarak, okunan voltaj değeri ile birlikte gerekli hesaplamalar yapılır ve öz direnç tayin edilir.

3.3.1.3. Değmesiz Öz direnç Yöntemi

Manyetik indüksiyon olarak da bilinen Değmesiz Öz direnç Yöntemi'nde, ölçüm cihazı beş sarımdan oluşur [43]. Ölçüm yapılacak olan kristal, on sarımlı birincil ve on sarımlı ikincil sarım arasına paralel olacak şekilde yerleştirilir. Kristal uçları arasında değişken manyetik alandan kaynaklanan bir elektriksel alan oluşur. Oluşan elektriksel alanın büyüklüğü, kullanılan malzemenin öz direncine bağlıdır.

Ölçüm sırasında, birincil sarımdan akım geçirilerek manyetik alan oluşturulur; kristal yerleştirilmeden ikincil sargının uçlarından, Maxwell yasasına göre oluşan indüksiyon elektromotor kuvvet ya da sinüsel gerilim değeri okunur. Kristalin yerleştirilmesiyle ikincil sargının uçları arasındaki sinüsel gerilim kristalin öz direnci oranında değişime uğrar. Bu ölçümlerden yararlanarak öz direnç değeri tespit edilir.

3.4. Manyetik Özellikler

Metalik camlar, yumuşak manyetik malzemelerdir. Homojen yapılarından dolayı, düşük manyetik koersiviteye, yüksek kalıcı mıknatıslanmaya, düşük histerisis kayıplarına ve yüksek manyetik geçirgenliğe (μ) sahiptirler. Yapı kusurlarının olmaması, domen yapılarındaki bozuklukların azalmasını sağlar.

3.4.1. Manyetik Duygunluk

Malzeme, B dış manyetik alan içerisine konulduğunda, M mıknatıslanması meydana gelir. Malzeme içindeki manyetik alan ($B_{iç}$);

$$B_{i\check{c}} = M + \mu_0 M \quad (3.31)$$

olur.

$B_{i\check{c}}$ aşırı iletken malzeme için 0 olacaktır. Birim hacim başına dipol moment magnetizasyon (M) olarak isimlendirilir. Manyetik alan ve manyetizasyon arasındaki bağıntı;

$$\chi = \frac{M}{B} \quad (3.32)$$

şeklinde olacaktır. Burada χ manyetik duyunluktur [44]. Manyetik duyunluk malzemenin türünün tespiti açısından önemli bir değerdir. Pozitif manyetik duyunluğa sahip malzeme paramanyetik, negatif manyetik duyunluğa sahip malzeme diamanyetik olarak adlandırılır.

3.4.2. Manyetik Geçirgenlik (μ)

Manyetik geçirgenlik (μ), herhangi bir malzemedan manyetik kuvvet çizgilerinin ne ölçüde kolaylıkla geçtiğini gösteren büyüklük olarak tanımlanır. Manyetik akı yoğunluğu (B) ve manyetik alan şiddeti (H) ile değişir [44].

Manyetik alan şiddeti H , manyetik geçirgenlik ile ters orantılı olarak değişir. Yani H küçük ise, manyetik geçirgenlik büyük; H büyük ise manyetik geçirgenlik küçük olacaktır. Miknatıslanma doyum noktasına ulaştığında manyetik geçirgenlik sabit olarak kabul edilecek, bu noktadan sonra ise küçük değerler alacaktır.

3.4.3. Manyetik Alanla Şekil Değişimi

Demir esaslı malzemeler; manyetik alana maruz bırakıldıklarında birbirine yakın atomların manyetik dipolleri kısmen de olsa eş yönlüleşir ve malzeme geçici ya da kalıcı miknatıslanma sergilemeye başlar. Bu özelliğe sahip malzeme gurubuna ferromanyetik malzemeler denir.

Demir (Fe), nikel (Ni) ve kobalt (Co) manyetik olarak oldukça kuvvetli maddeler olduklarından bu maddeler ferromanyetik maddelerdir. Bu maddeler zayıf bir dış

manyetik alan içinde bile birbirlerine paralel olarak yönelmeye çalışan manyetik dipol momentlere sahiptirler. Dış manyetik alan kaldırılrsa bile madde içerisinde paralel olarak yönelen dipol momentler aynı yönde sürekli olarak kalmaya devam ederler. Bu etki manyetik dipol momentlerinin birbirleriyle etkileşimden kaynaklanır.

Ferromanyetik malzemelerin en önemli özelliklerinden biri manyetik alana maruz bırakıldıklarında şekil değişikliğine uğramalarıdır. Bu malzemeler yapılarında, homojen manyetik kutuplanmış bölgeler olarak bilinen ve domen adı verilen bölgelerden oluşur. Malzeme manyetik alana maruz bırakıldığında domenlerin bölge sınırlarında kayma meydana gelir ve domenler dönerler. Bu da malzemede şekil değişikliğine neden olacaktır.

3.4.4. Curie Sıcaklığı

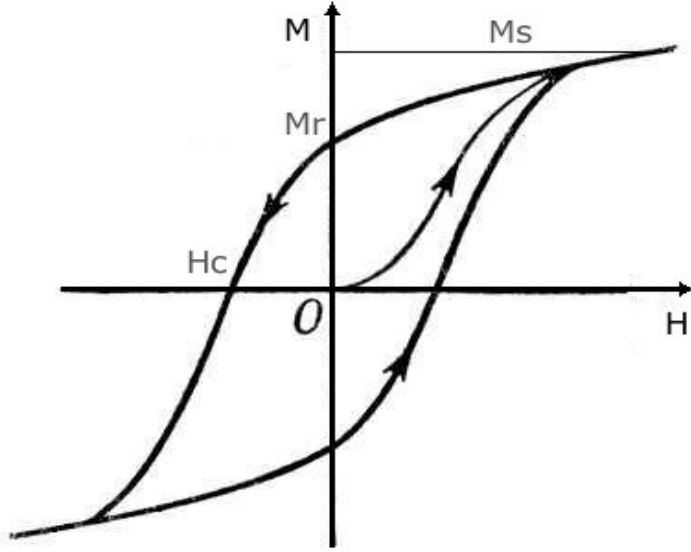
Pierre Curie, 1880 yılında piezoelektrik olayını, 1893'te ise mıknatısın sıcaklığa bağlılığını açıklayan 'Curie Yasası'nı ortaya koymuştur. Bu yasaya göre; ferromanyetik malzemelerin manyetik özellikleri Curie sıcaklığı (T_c) adı verilen sıcaklığın üzerinde değişir. Tablo 3.5'te bazı malzemelerin Curie sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 3.5. Kompozisyona Bağlı Olarak Curie Sıcaklıklarının Değişimi [4]

Kompozisyon	Curie Sıcaklığı
$Fe_{80}B_{20}$	375°C
$Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$	370°C
$Fe_{78}B_{13}Si_9$	415°C
$Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$	400°C
$Fe_{39}Ni_{39}Mo_4Si_6B_{12}$	260°C
$Co_{58}Ni_{10}Fe_5(BSi)_{27}$	270°C
$Fe_{77}Cr_2Si_5B_{12}$	365°C

3.4.5. Histerisis Eğrisi

Şekil 3.19’da ferromanyetik bir malzemenin şematik histerisis eğrisi görülmektedir. Başlangıçta manyetik momentler, dağınık vaziyettedirler. Manyetik alan şiddeti (H) artırılırsa, manyetik momentler manyetik alan yönünde yönelmeye başlayacak ve mıknatıslanma (magnetizasyon) doyum noktasına ulaşacaktır. Bu durumda malzeme mıknatıslanacaktır. H azaltıldığında ise mıknatıslanma azalacak ve manyetik alan şiddeti 0 olduğunda dahi malzeme hala mıknatıslık özelliği gösterecektir. H yönü değiştirilip, negatif yönde H uygulandığında mıknatıslanmanın 0 olduğu bir durum gözlenecektir. Bu yöndeki H artırılmaya devam edilirse, ters yönde manyetik momentler düzenlenecek ve doyum mıknatıslanmasına yeniden ulaşılmış olunacaktır. (-) yöndeki manyetik alan şiddeti azaltıldığında ise; hala kalıcı mıknatıslanmanın olduğu gözlenir. Bu durumda oluşan bu eğriye ‘Histerisis Eğrisi’ denir.



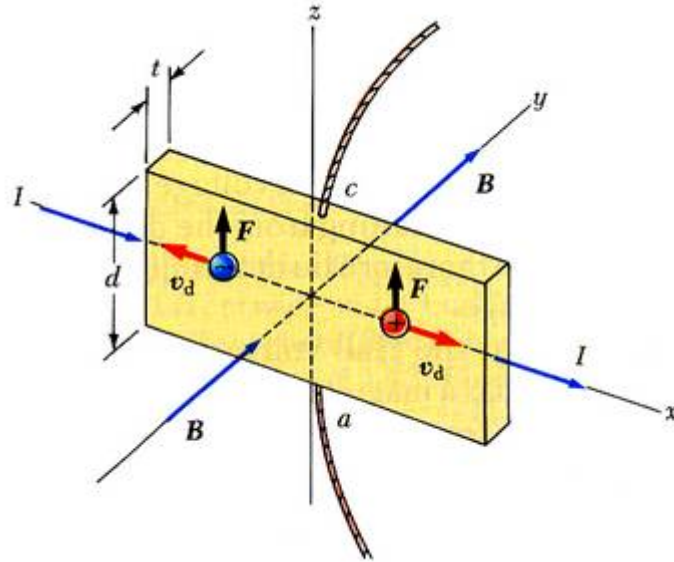
Şekil 3.19. Ferromanyetik Bir Malzemenin Histerisis Eğrisi

3.4.6. Hall Olayı

1879 yılında Amerikan fizikçisi Edwin Hall, akım taşıyan bir metal levhaya akım yönüne dik doğrultuda bir manyetik alan uyguladığı zaman, levhanın diğer iki kenarı arasında bir potansiyel fark meydana gelir. Bu olaya ‘Hall Olayı’ denir [45]. Şekil 3.19’da Hall olayının şematik gösterimi verilmiştir.

Hall olayı ile manyetik alanın büyüklüğü, yük taşıyıcılarının işareti ve yoğunluğu hakkında bilgi edinilebilir. Hall olayı bir iletkendeki yük taşıyıcılarının hızlarını belirlemek amacıyla da kullanılan bir yöntemdir. Uygulanan gerilime karşı kazanılan ortalama hıza sürüklenme hızı (v_d) denir.

Hall olayını gözlemek için, akım taşıyan bir iletkene bir manyetik alan uygulanır. Şekil 3.20’de gösterildiği gibi I , x yönünde ve B , y yönünde olduğu zaman, hem pozitif ve hem de negatif yük taşıyıcıları manyetik alan içinde yukarı doğru saparlar. Hall gerilimi, a ve c noktaları arasında ölçülür.

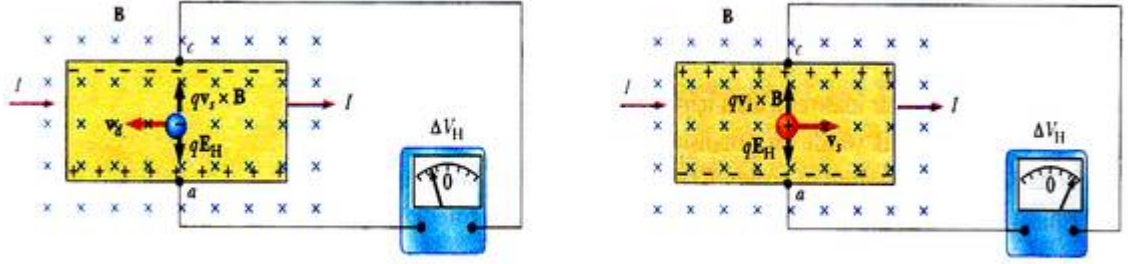


Şekil 3. 20. Hall Olayının Şematik Gösterimi [45]

Sürüklenme hızı ile hareket eden elektronlar, $\vec{F}_B = q\vec{v}_d \times \vec{B}$ şeklinde bir manyetik kuvvetin etkisinde kalıp, yukarı doğru saptırılarak üst kenarda, pozitif yükler ise alt kenarda toplanırlar. Elektrostatik alan nedeniyle yük taşıyıcılarının gördüğü kuvvet, manyetik kuvvet dengeleninceye kadar sürer. Denge durumuna ulaşıldığında elektronlar saptmazlar.

Şekil 3.21’deki gibi iletken kenarlar arasında voltmetre ya da potansiyometre yardımıyla, Hall gerilimi ölçülebilir. Yük taşıyıcıları pozitifse ve pozitif x yönünde hareket ediyorsa $q\vec{v}_d \times \vec{B}$ ile verilen yukarı doğru bir manyetik kuvvetin etkisinde

kalırlar. Bu kuvvet, iletkenin üst kenarında pozitif yüklerin, alt kenarında da negatif yüklerin birikmesine neden olur. Bu sebeptir ki, oluşan Hall geriliminin işareti, elektronların sapmasından kaynaklanan gerilimin ters işaretlisi olacaktır.



Şekil 3.21. Hall Olayında Yük Dağılımları [45]

Bir Hall olayı aygıtında yük taşıyıcıları negatif olduğunda, üst kenar negatif yüklü hale gelir ve c noktası a 'dan daha düşük bir potansiyelde olur.

Yük taşıyıcıları pozitif olduğunda ise üst kenar pozitif yüklü hale gelir ve c noktası a 'dan daha yüksek bir potansiyelde olur. Her iki durumda da, kenarlar tam olarak yüklendikten sonra, yani; yükleri birleştirmeye çalışan elektrostatik kuvvet qE_H ile manyetik kuvvet $qv_d B$ arasında bir denge oluştuğunda yük taşıyıcıları artık saptırılamazlar.

Denge halinde yük taşıyıcılarını etkileyen manyetik kuvvetin büyüklüğü $qv_d B$, elektrostatik kuvvet olan qE_H ile dengelenir. E_H , yük ayrımından kaynaklanan elektrik alanının büyüklüğü olmak üzere;

$$qv_d B = qE_H \quad (3.33)$$

$$E_H = v_d B \quad (3.34)$$

elde edilir. Hall gerilimi ise;

$$V_H = E_H d = v_d B d \quad (3.35)$$

şeklinde ifade edilir. Burada d iletkenin genişliğidir.

B ve d bilinenleriyle ölçülen hall gerilimi yük taşıyıcılarının sürüklenme hızını verir. Malzemenin akımı ölçülerek de yük taşıyıcılarının yoğunluğu (n) bulunabilir.

Sürüklenme hızı;

$$v_d = \frac{I}{nqA} \quad (3.36)$$

A iletkenin kesit alanı olmakla birlikte, (3.35) ve (3.36) eşitlikleri yardımıyla;

$$\Delta V_H = \frac{IBd}{nqA} \quad (3.37)$$

elde edilir. Şekil 3.19'a göre iletkenin kesit alanı $A=t.d$ şeklinde ifade edilebileceğinden;

$$\Delta V_H = \frac{IB}{nqt} = \frac{R_H IB}{t} \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradan Hall Katsayısı;

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (3.39)$$

şeklinde ifade edilir [45].

4. MATERYAL VE METOD

4.1. Numunenin Hazırlanışı

Bu çalışmada incelenen $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camı; en yaygın metalik cam üretim tekniklerinden biri olan ve Kesim 2.1.2’de detayları verilen Düzlem Akışlı Dökme Metodu ile Sheffield Üniversitesi’nde üretildi.

1,5 cm genişliğinde, 10 cm uzunluğundaki numune yapılacak olan analizlere göre uygun parçalara ayrıldı. Tavlama işlemi, Şekil 4.1’de gösterilen ve özellikle elektriksel iletkenlik ölçümleri için kullanılan, sıcaklığı 1100 °C’ye kadar çıkabilen, Protherm marka kül fırınında gerçekleştirildi. 500 °C sıcaklığa ayarlanan fırında numuneler 5 dk, 10 dk, 30 dk, 60 dk ve 120 dk tavlansak analizlere hazır hale getirildi. Numune fırın içerisinde ve fırından çıkarıldığında, sıcaklık kaybının önlenmesi amacıyla yalıtkan bir malzeme olan yutong taşı üzerine konuldu. Tavlansak ve tavlansakmayan numuneler, XRD ve sertlik analizleri için tavlansakmamış numuneler de çekme, elektriksel ve manyetik ölçümler yapılmak üzere analizlere hazır hale getirildi.



Şekil 4.1. Tavlama İşleminde Kullanılan Protherm Kül Fırını

4.2. Elementel Analiz

Elementel analiz, numunelerin kimyasal kompozisyonlarını tespit etmek için kullanılır. Numunelerin atomik ve ağırlıkça oranları bu analiz sayesinde tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının elementel analizi, Şekil 4.2’de TruSpec Micro cihazı ile Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi’nde yapılmıştır. TruSpec Micro elementel analiz cihazı, homojen organik maddelerdeki C, H, N ve S bağımsız dedektörler kullanarak, eşzamanlı olarak 4 dk’dan daha kısa sürede analiz yapabilen bir cihazdır.



Şekil 4.2. TruSpec Micro Elementel Analiz Cihazı

Elemental analiz için $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik cam, öncelikle alkolle dikkatlice temizlenerek numune tutturucuya yapıştırıldı. Çalışılacak bölgeye odaklanılarak, yüzeyden itibaren belli bir derinliğe kadar elementel analiz yapıldı ve numune için kimyasal kompozisyonlar belirlendi. Elde edilen sonuçlar Bölüm 5’te verildi.

4.3. X-Işını Kırınımı

Numunenin amorf yapıda olup olmadığı elde edilen XRD deseni ile anlaşılır. X-Işını Kırınım analizinin amacı, numunenin amorf yapısını ve derecesini irdelemektir. XRD deseni tek ve geniş bir pikten oluşuyorsa numune amorf; bunun yerine belirgin ve bağımsız keskin pikler mevcutsa numunenin kristal yapıda olduğu anlaşılır.

Bu çalışmada XRD analizi için Şekil 4.3'te görülen Erciyes Üniversitesi'ndeki Bruker AXS D8 cihazı kullanıldı. Cihaz; yüksek gerilim jeneratörü 20 kV-60 kV ve 6 mA-80 mA aralığında full otomatik ve bilgisayar kontrollü olarak çalışma kapasitesine sahiptir. Sistem X-ışını kaçaklarına karşı korumalı olan özel kabin içerisindedir. Seramik X-ışınları tüpü ile donatılmış olup Cu seramik tüp kullanılmaktadır. Numuneden difrakte olan X-ışınları Nal (TI) tipi sintilasyon dedektörü ile toplanmakta ve sisteme bağlı bulunan bilgisayar ünitesi yardımıyla değerlendirilmektedir.



Şekil 4.3. Bruker AXS D8 Model XRD Cihazı

Ayrıca, tavlınmamış haldeki $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının XRD analizi için Pakistan'da COMSATS Bilgi Teknolojisi Enstitüsü, Termal Uygulamalı Fizik Laboratuvarı'nda Panalytical X-Pert Pro XRD sistemi ile de ölçüm alındı. $1,548 \text{ \AA}$ dalga boyunda X-Işını üretimi için Cu tüp kullanılmıştır. Analizde yüksek gerilim jeneratörü 40 kV ve 30 mA değerlerinde kullanılmıştır. Şekil 4.4'te analiz için kullanılan cihaz görülmektedir.



Şekil 4.4. Panalytical X-Pert Pro XRD Cihazı

4.4. Vickers Sertlik Ölçümü

Sertlik; bir metalin kalıcı şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direncinin bir ölçüsüdür. Numune ne kadar sert ise işlenebilirlik de o derece zor olacaktır. Bu çalışmada kullanılan metalik cam numunesinin sertliği; en sert malzemelerde dahi kullanıma elverişli olan Vickers sertlik ölçme metodu ile ölçülmüştür.

Numuneler çok ince olduğundan ($30\mu\text{m}$) sertlik ölçümü yapabilmek için önce kalıplandı. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere numuneler alüminyum folyo üzerine yerleştirildi, incelenecek yüzey alta gelecek şekilde ters çevrilerek yapışkanlı alüminyum folyoya tutturuldu ve numune kalıbı yerleştirilip, üzerlerine epoksi resin döküldü. Kalıptan 8 saat sonra çıkarılmak üzere kurumaya bırakıldı.



Şekil 4.5. Sertlik Analizleri için Numunelerin Kalıplanması

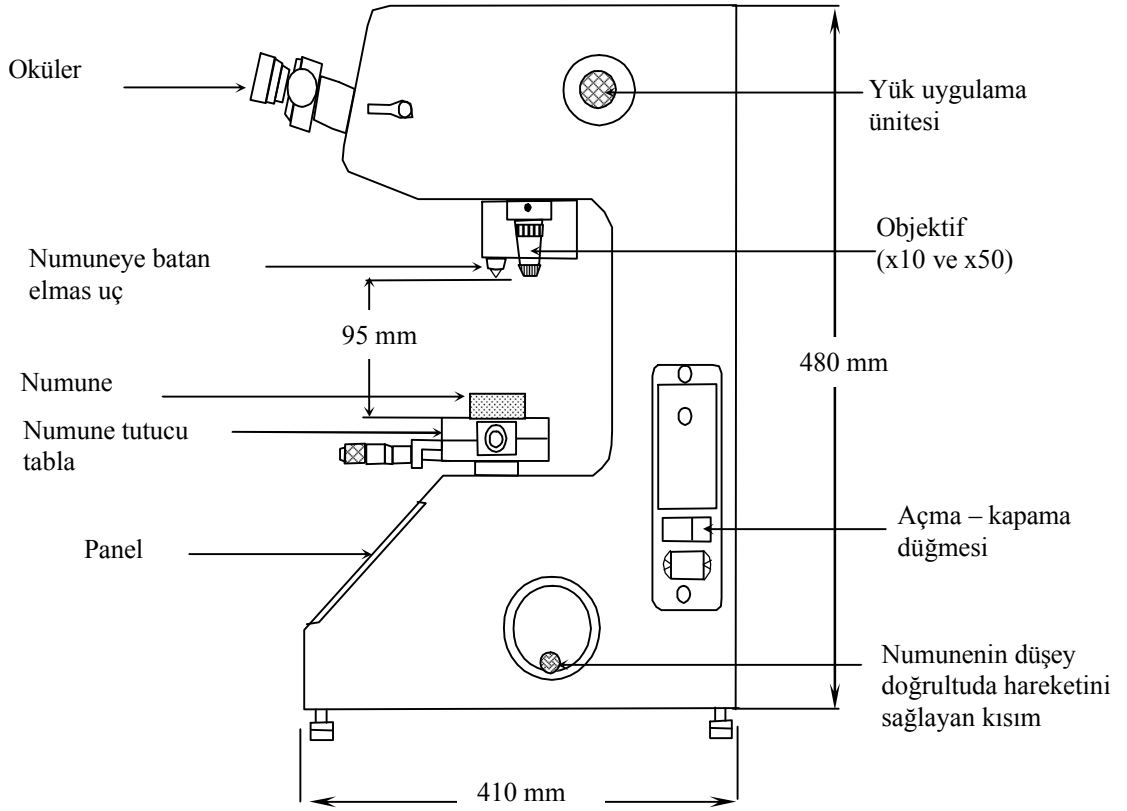
Mikrosertlik değerleri Şekil 4.6’da görülen Future-Tech marka FM-700 model dijital mikrosertlik test cihazı ile ölçülmüştür. Doğrusal katılaştırılan malzemelerin mikrosertlik ölçümlerinde kullanılan bu cihazın şematik yapısı ise Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.6. Mikrosertlik Test Cihazı

Vickers sertlik ölçümünde kullanılan batıcı uç, yüzeyleri arasında 136° açı bulunan bir elmas piramittir. Darbelere karşı daha hassas olduğundan en sert malzemeler bile

bu metotla ölçülebilir. Uygulanan yük 1 gr ile 1000 gr arasında değişmektedir. Batıcı uç numuneye 5-30 saniye zarfında uygulanarak, numunede piramit şeklinde iz oluşturulmaktadır. İzin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak alan belirlenir. Vickers sertliği (H_V)’ de, Brinell sertliğine benzer şekilde, eşitlik (3.2)’de verildiği üzere uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile belirlenir.



Şekil 4.7. Mikrosertlik Test Cihazının Şematik Görünüşü

4.5. Çekme Testi

Çekme testi numunelerin mekanik özelliklerini incelemek ve mukavemetlerini belirlemek amacıyla yapılır. Çekme testi ile numunenin elastiklik katsayısı, elastiklik sınırı, uzaması, çekme dayanımı ve akma gerilmesi gibi özellikleri hakkında bilgi edinilir.

Numunenin çekme testi ölçümü; Şekil 4.7’de gösterilen Erciyes Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde Shimadzu AG-XD50Kn çekme-

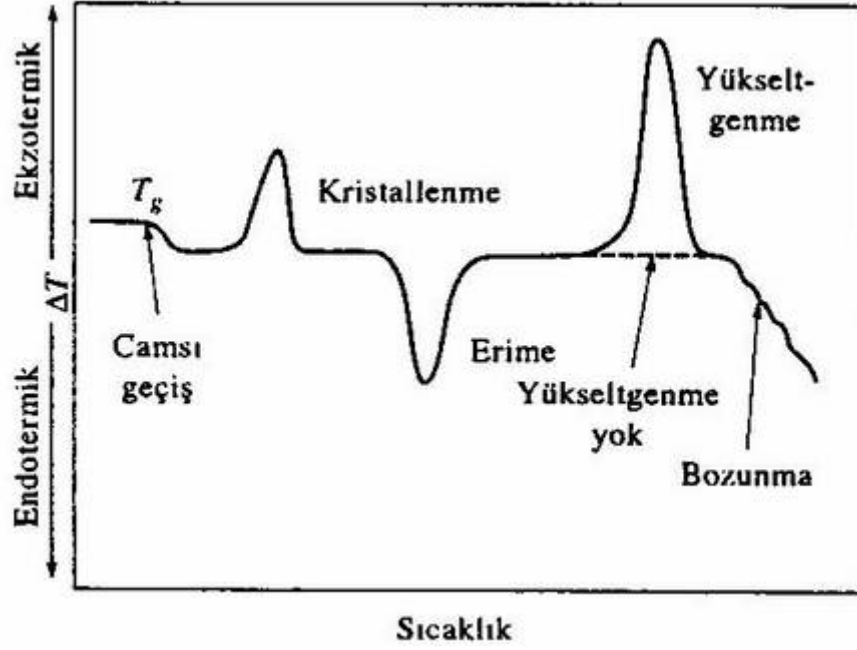
basma test cihazı ile ölçülmüştür. Maksimum hız uygulayabilme özelliğine sahip olan bu cihaz; stroke, force ve stres kontrollü test yapabilme özelliğine sahiptir. Test alanı 500 mmx1060 mm, test hızı aralığı 0,005-1000 mm/dk'dır.



Şekil 4.8. Shimadzu AG-XD50Kn Çekme-Basma Test Cihazı

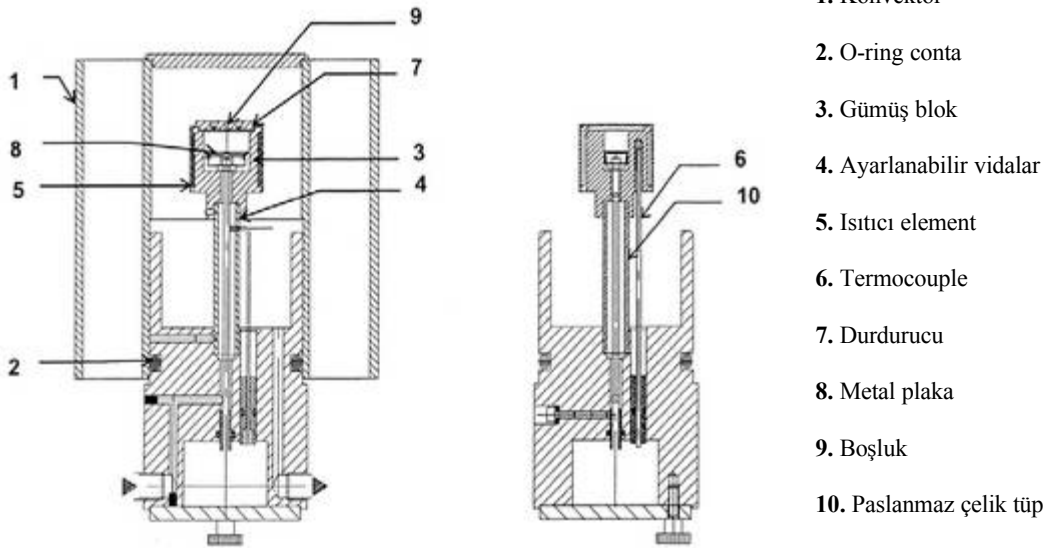
4.6. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi

DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri), numune ve referansın ısı akışı arasındaki farkı, kontrollü sıcaklık değişimi uygulayıp, sıcaklığın fonksiyonu olarak inceleyen termal analiz yöntemlerinden biridir. DSC; biri incelenen örneğe, diğeri referans maddeye ait olmak üzere bir çift kalorimetriden meydana gelir. Kalorimetrelerin ısıtıcıları aynı sıcaklıkta sabit tutulur. İki kalorimetreye bağlanan güçler arasındaki fark, numunedeki enerji değişim hızını ölçerek, zamanın fonksiyonu olarak kaydeder. Malzemelere kontrollü sıcaklık programı uygulandığında oluşabilecek muhtemel değişimleri gösteren diferansiyel termogram şeması Şekil 4.9'da verilmiştir [46].



Şekil 4.9. Malzemelere Kontrollü Sıcaklık Programı Uygulandığında Oluşabilecek Değişimleri Gösteren Diferansiyel Termogram Şeması [46].

Numunenin sıcaklığa karşı verdiği tepkiler, numunenin kalitesi, yapısı, saflığı ve dayanıklılığı gibi birçok önemli özellikleri hakkında bilgi verir. Ölçümler Bozok Üniversitesi, Enstrümental Analiz Laboratuvarı'ndaki SETARAM DSC 131 kullanılarak yapılmıştır. Bu cihazın şematik gösterimi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. SETARAM DSC 131 şematik gösterimi [42]

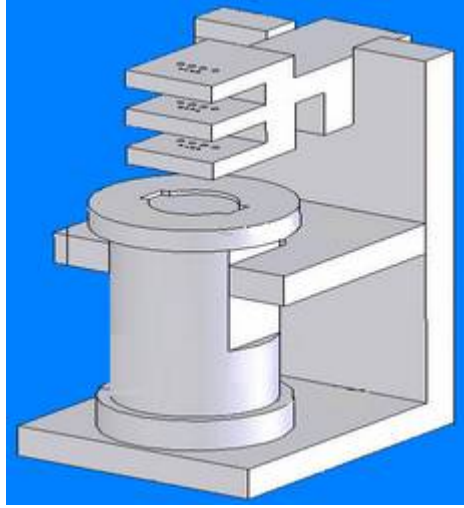
SETARAM DSC 131'in bazı önemli teknik özellikleri şöyledir: Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı ısı akışı (Heat-Flux) tipindedir. Cihazın çalışma sıcaklık aralığı; -170 °C ile +700 °C arasındadır. Isı akış ölçüm aralığı: $-15\mu V < \text{drift} < 15\mu V$ 'dur. Isıtma hızı 0,001 ile 100 °C/dk arasında programlanabilir. Cihazda numune atmosferi olarak asal gaz (azot veya helyum), reaktif gazlar veya hava kullanılabilir. Bu gazların akış hızları, gaz akış kontrol ünitesi vasıtasıyla ayarlanabilir. Cihazın sensör kısmında zamanla oluşacak kirliliği düzenli olarak gidermek için otomatik temizleme programı bulunmaktadır. Cihazda -170 °C sıcaklığa inebilmek için sıvı azot soğutma ünitesi bulunur. Cihaz, sıvı azot ile de 400 °C den 0 °C ye yaklaşık 3 dakikada, 400 °C den -70 °C ye ise yaklaşık 4,5 dakikada soğutmaktadır. Analiz bittikten sonra cihazın sıcaklığı helyum taşıyıcı gaz ve cihazda bulunan soğutma ünitesi kullanılarak 500 °C den 40 °C ye 10 dakikada gelmektedir. Soğutma ünitesi kullanmadan 30 dakikada soğutmaktadır. Bunun için ekstra fan ve vantilatör sistemlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Cihazın tüm kontrolü ve veri işleme fonksiyonları interface ünitesi PC/yazıcı ve Windows XP altında çalışan yazılımıyla gerçekleştirilir. Cihaz bir analizi gerçekleştirirken önceden alınmış termograflar hafızadan çağrılarak veri manipülasyon işlemleri (multi taking) yapabilme imkanı verir. Sistem yazılımının rapor formatı tamamen kullanıcının istediği şekilde ayarlanabilir ve rapora Word, Excell gibi nesnelere eklenebilir. Yazılımda termogram üzerinde endotermik/ekzotermik reaksiyon, camsı geçiş (T_g) noktası, erime noktası (T_m), kristalizasyon noktası (T_c), termal dekopozisyon gibi termal reaksiyonlar tespit edilip reaksiyon enerjileri ile reaksiyon sıcaklıkları termogram üzerinde gösterilebilmektedir. Yazılımda 1. ve 2. dereceden türev, zemin düzeltilmesi, pürüzsüzleştirme ve farklı termogramların tek pencerede gösterilmesi gibi veri işlemleri yapılabilir.

DSC analizleri için öncelikle numune ve referansların kütleleri ayrı ayrı hassas terazide tartıldı. 10 K/dk, 15 K/dk, 20 K/dk ve 25 K/dk ısıtma hızları için sırasıyla numunelerin kütleleri 5,153 mg, 5,788 mg, 5,268 mg, 5,545 mg ve 5,135 mg olarak ölçüldü. Referans madde olarak kullanılan safirin kütlesi ise 17,629 mg olarak ölçüldü. DSC cihazından boş-boş, numune-boş ve safir-boş olmak üzere her ısıtma

hızı için analizler tekrarlandı ve HF-T verileri kaydedildi. Sonuçlar Bölüm 5’te verildi.

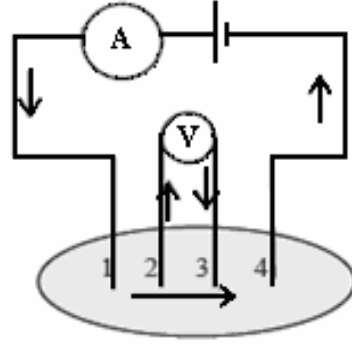
4.7. DC Dört Nokta Yöntemi İle Elektriksel İletkenlik Ölçümü

$Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik cam numunesi için özdirenç ölçümleri, DC Dört Nokta İletkenlik Ölçüm sistemi ile yapıldı. Numune, Şekil 4.11’de gösterilen yüksek ısıya dayanıklı (1200 °C) ve yüksek sıcaklıkta iletkenlik göstermeyen alüminadan yapılmış iletkenlik ölçüm kitine yerleştirildi.



Şekil 4.11. Elektriksel İletkenlik Ölçüm Kiti [47]

Numune üzerine yaklaşık 0,6 mm çaplı 4 platin tel aralarındaki mesafe 1 mm olacak şekilde temas ettirildi. Kontaklardan ikisi, numune üzerinden geçen akımı ölçmek amacıyla, diğer ikisi de herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı ölçmek amacıyla kullanıldı. Güç kaynağı olarak, Keithley 2400, data eldesi için de Keithley 7700 multimetre, dataların bilgisayara aktarılması ve cihazların kontrolü için de Keithley 488.2 Interface kart kullanıldı. Şekil 4.12’de DC Dört Nokta İletkenlik Ölçüm Tekniği’nin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 4.12. DC Dört Nokta Elektriksel İletkenlik Ölçüm Tekniği Çalışma Prensibi [47].

4.8. Hall Ölçüm Sistemi

Numunenin özdirenç ve Hall etkisi ölçümleri van der Pauw tekniği kullanılarak yapıldı [48]. Son zamanlarda van der Pauw tekniğinin geçerliliği ve termal yolla üretilen potansiyel hataları ve manyetik direnç etkileri Look tarafından tartışıldı [49].

Bu teknik, numune yüzeyinde dört köşede simetrik dört kontak gerektirir. Şekil 4.13'te görüldüğü gibi akım gerilim değişimini izlemek için sadece dört ölçüm; iki özdirenç ve iki Hall voltajı ölçümü yeterlidir. Bununla birlikte ölçülen Hall voltajı üzerindeki diğer etkiler Look tarafından;

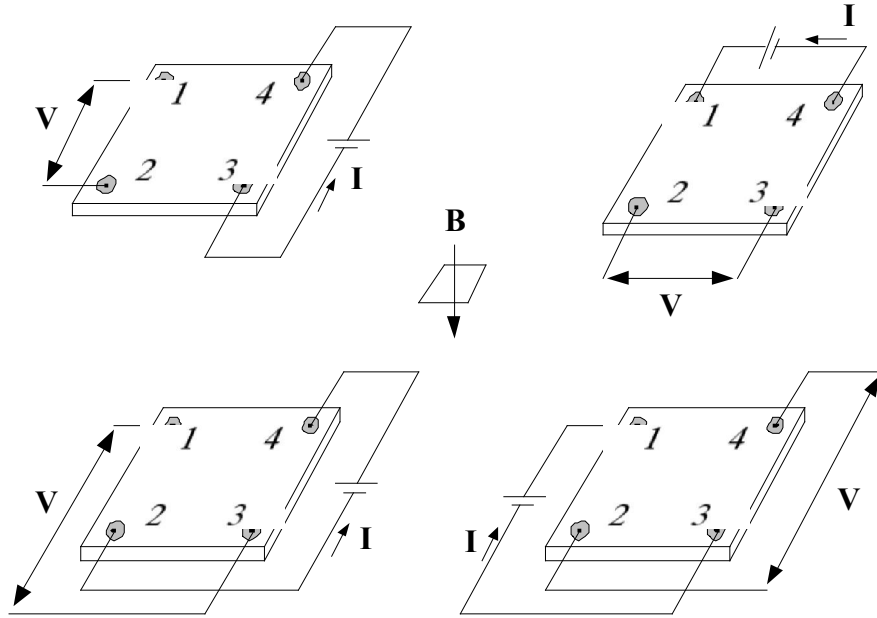
$$V_{H0} = V_H + V_N + V_R + V_E \quad (4.1)$$

olarak verilmiştir [49].

Manyetik alanı varken, harici akıma maruz kalmaksızın numunenin uçları arasında sıcaklık farkı oluşursa elektronlar sıcak bölgelerden numunenin sonlarındaki soğuk bölgelere hareket etme eğilimi gösterirler ve bu yolla bir akım oluştururlar. Oluşan bu akım, manyetik alanla doğru orantılıdır. Bu olay (V_N) Nernst veya Nernst-Ettingshausen etkisi olarak bilinir. Bu elektronların yayılmaları sıcak ve soğuk bölgeler oluşturur, böylece tekrar bir Seebeck potansiyeli oluşur. Bu potansiyel Righi-Leduc potansiyeli (V_R) olarak bilinir. Harici bir sıcaklık değişimi olmasa bile

numune kendisi bu değişimi oluşturabilir. Çünkü yavaş (soğuk) ve hızlı (sıcak) elektronlar böylece dahili olarak üretilen Seebeck etkisi oluşturur. Bunun aksine harici olarak Seebeck etkisi bir potansiyel üretir. Bu potansiyel (V_E) Ettingshausen etkisi olarak bilinir ve hem manyetik alanla hem de akımla orantılıdır.

Akım ve manyetik alan değişimine bağlı olarak maksimum doğruluk elde etmek ve Ettingshausen, Nernst ve Righi-Leduc etkileri olarak verilen ısısal olarak üreyen potansiyelleri elimine etmek için direnç ve Hall etkisi ölçümü yapıldı.



Şekil 4.13. Direnç (a ve b) ve Hall Mobilitesi (c ve d) Ölçümleri İçin Şematik Gösterimi.

Numune kalınlığı, sadece hacimsel özdirenç ve Hall taşıyıcı yoğunluğu için gereklidir. Yüzeysel özdirenç ve Hall taşıyıcı yoğunluğu için bilinmesi gerekli değildir. Ölçümü alınan numunenin şekli ve homojen olmaması gibi sebepler manyetik alan etkisindeki özdirençte değişime sebep olabilir. Yüksek elektron mobilitesine sahip malzemeler için, bu etkiler çok büyüktür. Hall etkisinin gözlemlendiği materyalin manyetik olması gerekmemektedir.

Bu çalışmada $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik cam numunesi için yüzey özdirenci, taşıyıcı yoğunluğu ve Hall mobilitesinin manyetik alanla değişimi de incelendi. Ölçümler Gazi Üniversitesi'nde, bilgisayar kontrollü Lake Shore yüksek empedans sisteminde yapıldı. Şekil 4.14'te deneysel sistem görülmektedir.

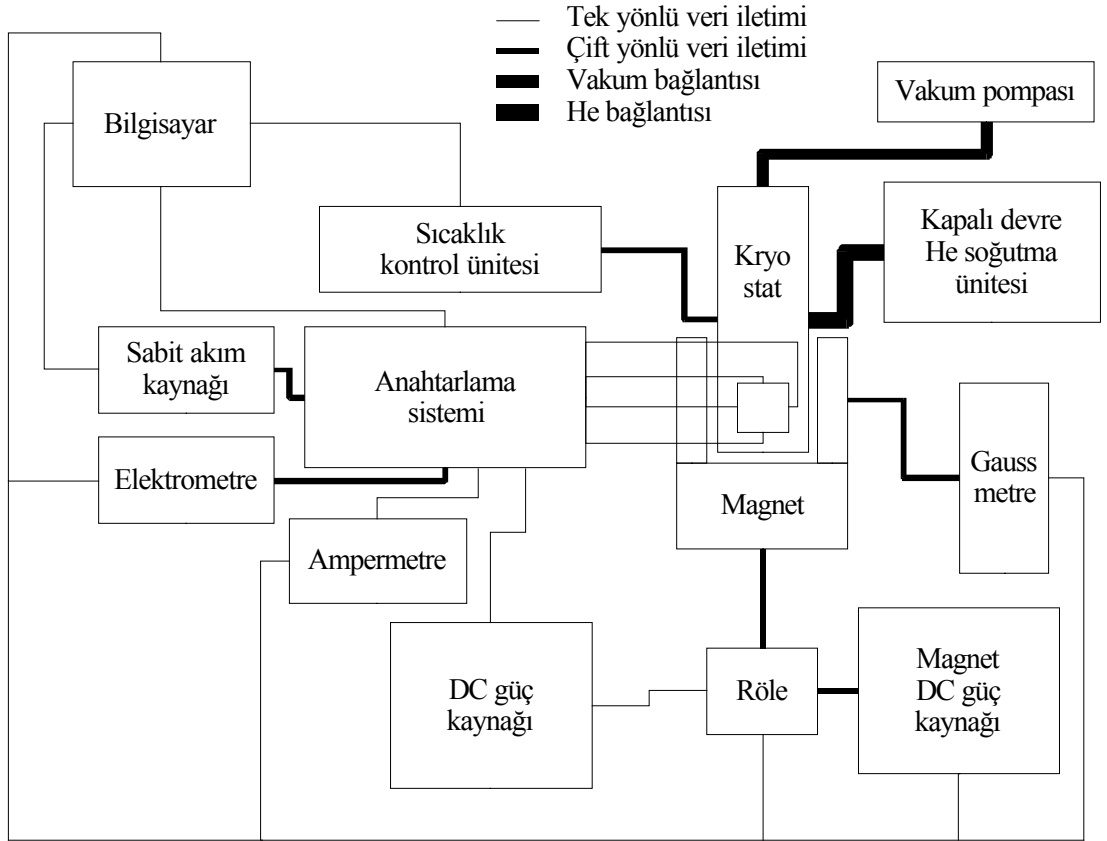


Şekil 4.14. Lakeshore 7700A Tipi Yüksek Empedans Hall Etkisi Sistemi (1) He Tüpü, (2) Kapalı Devre He Soğutma Ünitesi, (3) Vakum Pompası, (4) Kryostat, (5) Magnet Sistemi, (6) Magnet Güç Kaynağı, (7) Bilgisayar, (8) Sıcaklık Kontrol Ünitesi, Ölçüm Cihazları, Anahtarlama Sistemi, Manyetik Alan Ölçüm Sistemi vb... İçeren Enstrüman Dolabı, (9) Su Soğutma Sistemi

Kare formdaki numuneye gümüş pasta ile kontaklar alındı. Mikroskop altında, numunenin üzerindeki kontakların simetrisi ve fiziksel durumları gözlemlendi. Kontakların her biri için, tel ile numune arasında tam bir köprü oluşturması ve numune üstüne düşen kısmın dairesel simetri göstermesi planlandı. Ayrıca tüm kontaklar numuneye simetrik olarak düşmüş olması sağlandı ve dolayısıyla da van der Pauw tekniğiyle iyi sonuçlar elde edilmesi sağlandı.

Kontaklar kurumaya bırakılarak, kontakların sağlamlığından emin olunduktan sonra numune, kontaklara zarar vermeden çok dikkatli bir şekilde numune tutucuya yerleştirildi. Daha sonra bu aparat numune tutucuya lehimlenerek sabitleştirildi. Son olarak, numune tutucu dikkatli bir şekilde kryostat içine yerleştirildi. Ölçümlerden sonra çıkarılan numune dikkatlice lehimlendiği yerden çıkarıldı.

Deney sisteminin blok diyagramı Şekil 4.15'te verildi. Şekilde görülen sabit akım kaynağı, elektrometre, anahtarlama sistemi, sıcaklık kontrol ünitesi ve magnet güç kaynağı Lake Shore HMS programı ile kontrol edilmektedir.

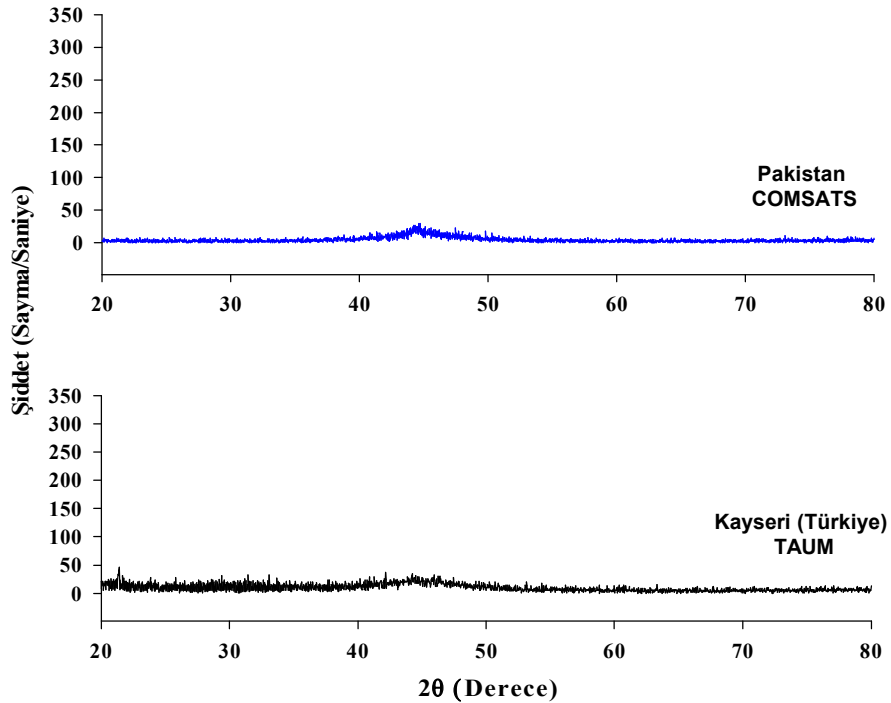


Şekil 4.15. Hall Etkisi Ölçüm Sistemi Blok Diyagramı

5. SONUÇLAR

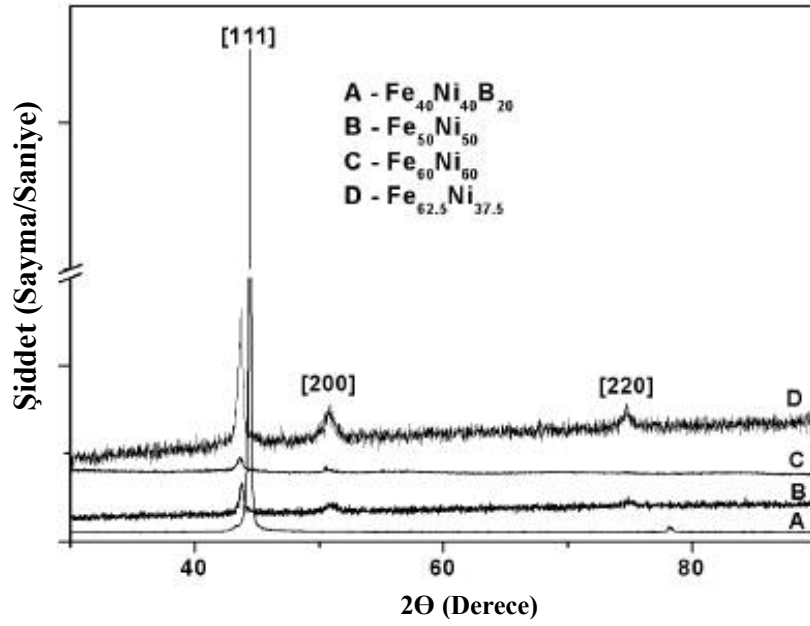
5.1. X-Işını Kırınımı Sonuçları

X-ışını kırınımı analizleri yapabilmek ve tavlama işlemlerinde de kullanabilmek için numune, her biri 0,5 cm² olan kare şeklinde 7 eşit parçaya ayrıldı ve her biri aseton ile temizlendi. Öncelikle tavlınmamış Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camının X-ışını kırınım analizi Cu K_α X-ışını kırınımı ile Erciyes Üniversitesi Teknoloji Geliştirme ve Uygulama Merkezi'nde (TAUM) Bruker AXS D8 Model XRD analiz sistemi ile yapıldı. Ayrıca, karşılaştırmak amacıyla XRD analizi Pakistan'da COMSATS Bilgi Teknolojisi Enstitüsü, Termal Uygulamalı Fizik Laboratuvarı'nda Panalytical X-Pert Pro XRD sistemi ile de yaptırıldı. Şekil 5.1'de yapılan XRD sonuçları verilmiştir. Her iki XRD deseninde de kristal yapılarda olduğu gibi keskin bir pik gözlenmediği için yapı amorf yapıdadır ve iki analiz arasında bir uyum söz konusudur.



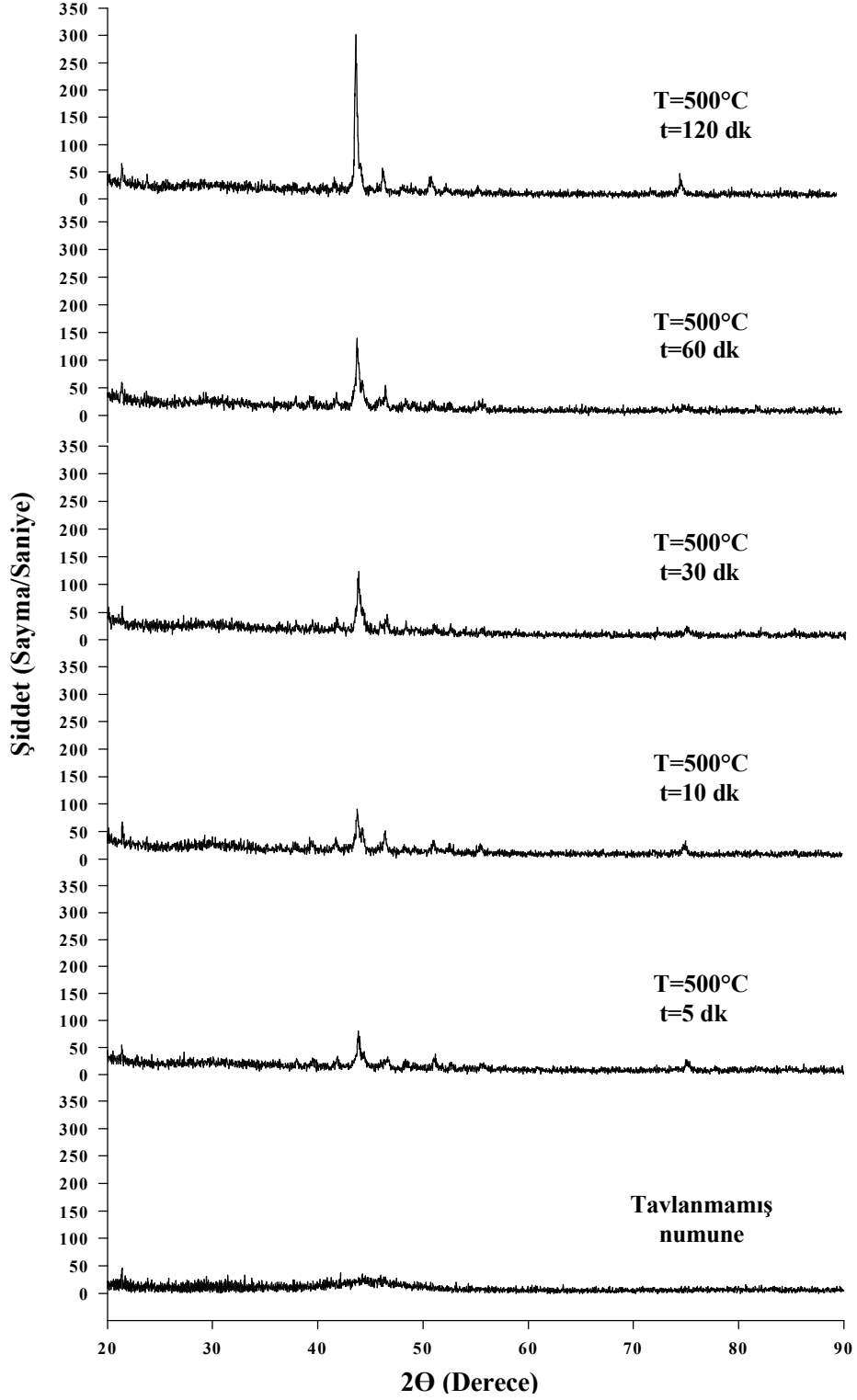
Şekil 5.1. Tavlınmamış Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Metalik Camının XRD Desenleri

$Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ alaşımı ve farklı kompozisyonlardaki FeNi alaşımlarının kristal yapısının ve manyetik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada yer alan XRD desenleri Şekil 5.2’de verilmiştir [50]. Fe-Ni fazı için ana kristallenme piki $43,45^\circ$ de gözlenmiştir. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının analizi, daha önce yapılan analiz ile aynı değerde pik verdiği için uyum söz konusudur [50].



Şekli 5.2. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ ve FeNi Alaşımları için XRD Desenleri [51]

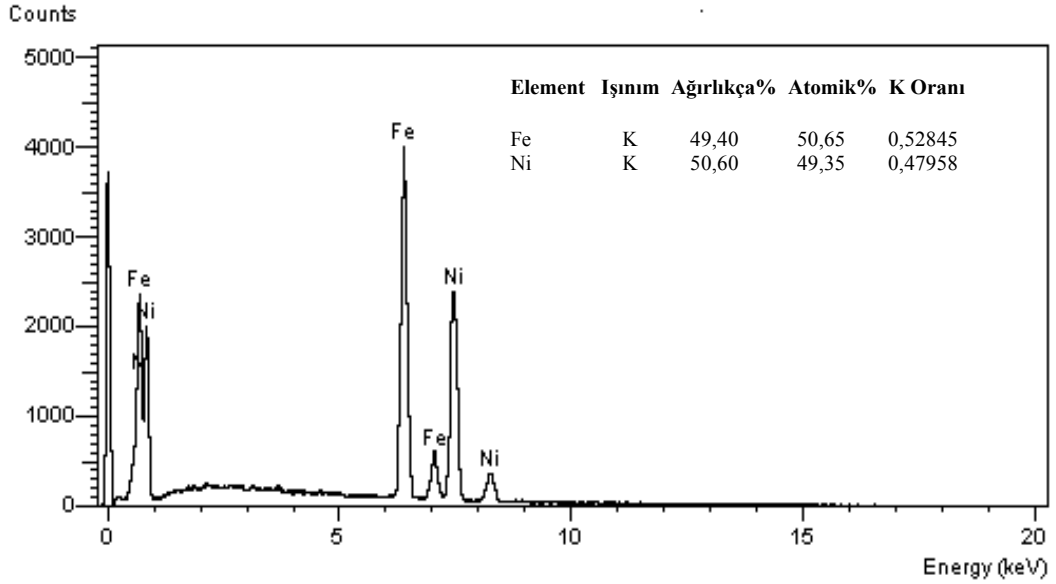
Tavlama işleminin numunelerin amorf yapısı üzerine etkilerini incelemek amacıyla, diğer parçalar $500^\circ C$ ’de ısıtılmış fırında sırası ile 5 dk, 10 dk, 30 dk, 60 dk ve 120 dk boyunca tavlandı. Tavlanan numuneler için ayrı ayrı XRD analizleri yapıldı. Şekil 5.3’te tavlammamış haldeki $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının XRD deseni ve tavlama sonucunda elde edilen XRD desenleri görülmektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde, numunenin amorf yapıya sahip olduğu, tavlama sonucunda keskin piklerin oluşmaya başladığı ve tavlama süresi arttıka kristallenmenin de arttığı görülmektedir.



Şekil 5.3. Tavlanmamış ve 500 °C’de 5 dk, 10 dk, 30 dk, 60 dk ve 120 dk Sürelerle Tavlanmış Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Metalik Camı için XRD Analiz Verileri

5.2. Elementel Analiz Sonuçları

$Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının kimyasal bileşiminin tespit edilmesi amacıyla elementel analiz yapılmıştır. Numune için elde edilen elementel analiz sonucu Şekil 5.4'te verilmiştir. TruSpec Micro Elemental Analiz cihazında bakır tüp kullanıldığı için bor elementini çözememiştir. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camı için ortalama atomik dağılımlar Fe: 50,65; Ni: 49,35 şeklinde elde edildi. Analizler sonucunda Fe ve Ni elementlerinin yaklaşık olarak aynı orana sahip oldukları görülmüş, analiz Cu tüpü ile yapıldığı için B elementi çözülememiştir.



Şekil 5.4. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Numunesi için EDX Analizi

5.3. Vickers Sertlik Ölçüm Sonuçları

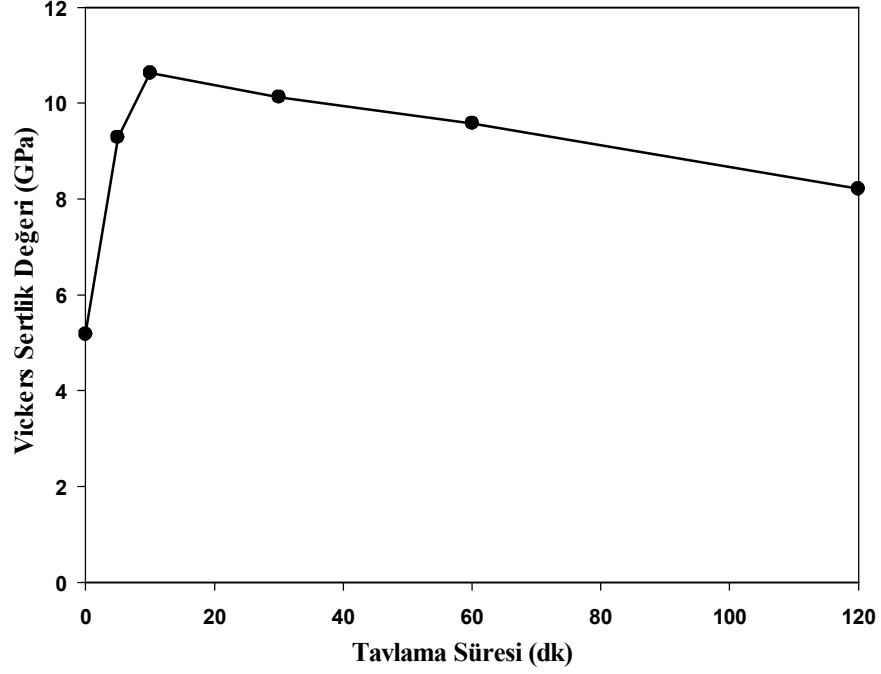
$Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının Vickers sertlik (HV) ölçümü Future-Tech marka FM-700 model dijital mikrosertlik test cihazı ile yapıldı. Numuneler sırasıyla test cihazına bağlanarak, Vickers yöntemiyle çok sayıda ölçüm alındı. Vickers sertlik ölçme yöntemi ile yapılan analizlerde, uygulanan yük 100 g'dır. Batıcı uç numuneye 7 sn zarfında uygulanarak, numunede piramit şeklinde iz oluşturuldu. İzin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak alan belirlendi. Kesim 3.1.1.2'de açıklandığı gibi uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile Vickers sertlik değeri

ölçüldü. Tablo 5.1’de $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ numunesi için tavlama süresine bağlı olarak ortalama mikrosertlik ölçüm değerleri verildi.

Tablo 5.1. $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ Numunesi için Tavlama Süresine Göre Ortalama Mikrosertlik Ölçüm Değerleri

Tavlama Süresi (dk)	Ortalama HV (GPa)
Tavlanmamış	5,18
5	9,29
10	10,63
30	10,13
60	9,58
120	8,21

Şekil 5.5’te $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ metalik camının Vickers sertlik değerlerinin tavlama süresi ile değişimi görülmektedir. Şekil 5.5’te görüldüğü gibi, numune 10 dk tavlandıktan sonra rahatlama (stress relaxation) başladığından dolayı sertlik değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

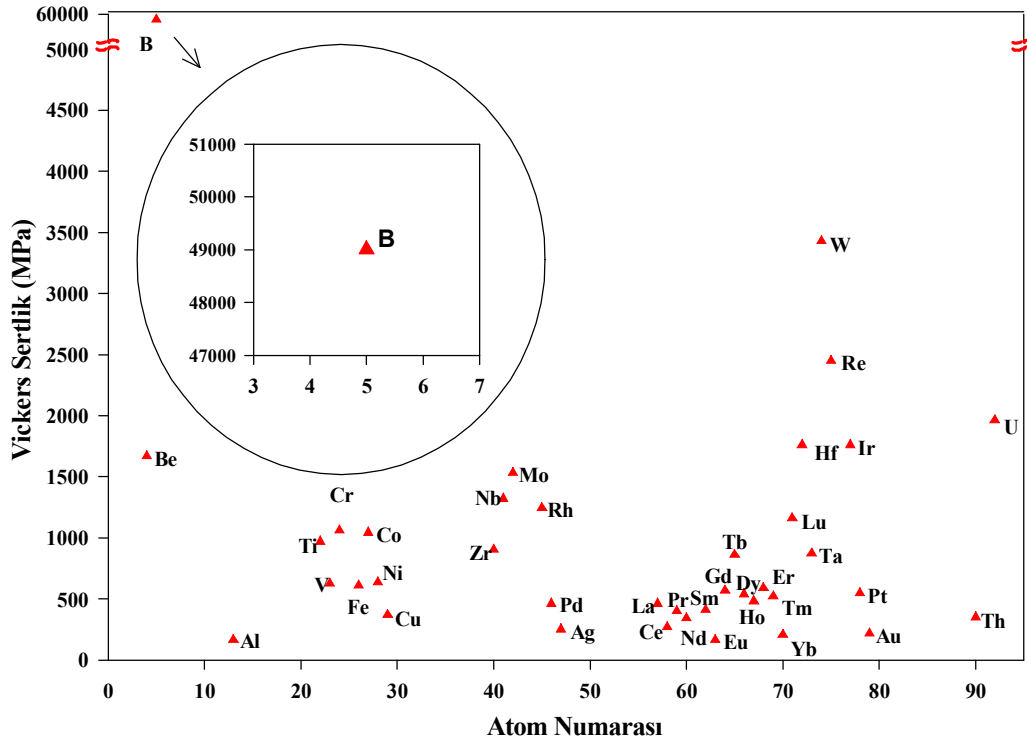


Şekil 5.5. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Metalik Camının Vickers Sertlik Değerlerinin Tavlama Süresi ile Değişimi.

Tablo 5.2’de saf Fe, Ni ve B elementlerinin ve bu elementleri içeren bazı alaşım ve metalik camların sertlik değerleri verilmiştir. Sertlik değerleri genel olarak literatürdeki değerlerle uyum içerisindedir. Şekil 5.5’te görüldüğü gibi numune 10 dk tavlama sonucunda maksimum sertlik değerine ulaşmıştır. Uygulamalarda sert malzemeye ihtiyaç duyulduğunda, numune 10 dk tavlama sonucunda kullanıma daha elverişli hale gelmektedir. Bor içeren alaşımların sertliklerinin yüksek olmasının B elementinden kaynaklandığı açıktır. B elementinin periyodik tablodaki metallerle kıyaslandığında en yüksek sertlik değerine sahip bir yarı metal olduğu görülür. Şekil 5.6’da metallerin Vickers sertliklerinin atom numaralarıyla değişimleri karşılaştırılmıştır. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi B elementi çok sert bir elementtir.

Tablo 5.2. Bazı Metalik Camların ve Fe, Ni ve B Elementlerinin Vickers Sertlik Değerleri

Numune	HV (GPa)
Fe [52]	0,608
Ni [52]	0,608
B [52]	49
Ni ₃₆ Fe ₃₂ Cr ₁₄ P ₁₂ B ₆ [51]	6,1
Ni ₄₉ Fe ₂₉ P ₁₄ B ₆ S ₂ [51]	5,5
Fe ₈₀ P ₁₆ C ₂ B ₁ [51]	5,8
Pd _{77,5} Cu ₆ Si _{36,5} [51]	3,4
Fe ₈₀ B ₂₀ [51]	7,6
Fe ₄₀ Ni ₄₀ B ₂₀ [Bu çalışma]	5,18

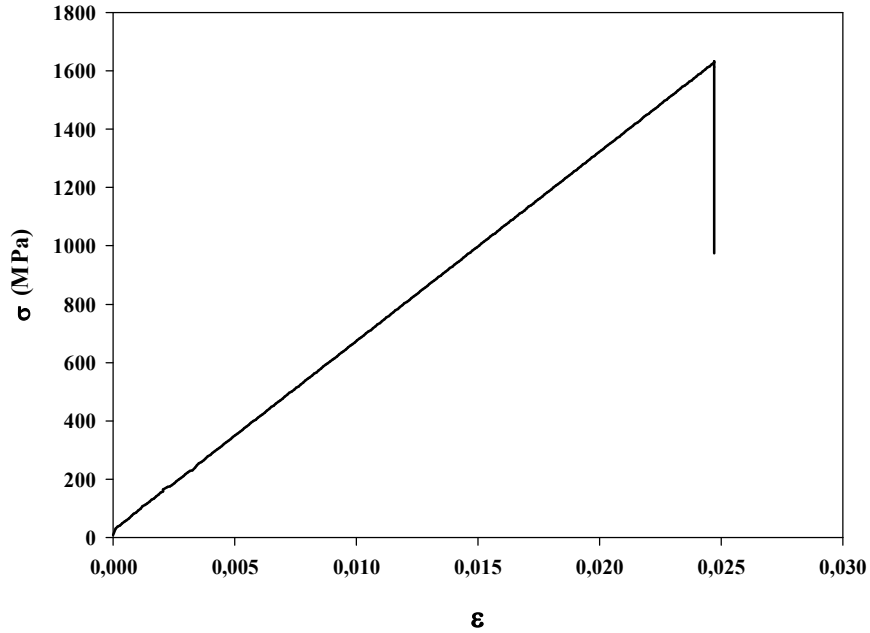


Şekil 5.6. Metallerin Vickers Sertliklerinin Atom Numarasıyla Değişimi

5.4. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi malzemelerin mukavemet özelliklerini belirlemek için uygulanan çok önemli bir testtir. Çekme testi ölçümü ile malzemelerin elastisite modülü, maksimum yüzde uzaması, çekme dayanımı ve tokluğu gibi birçok özelliği hakkında bilgi edinilir.

Çekme testi Erciyes Üniversitesi'ndeki Shimadzu AG-XD50Kn cihazı ile yapıldı. Öncelikle $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik cam numunenin boyutları ölçüldü ve ebatları yazılıma kaydedildi. Numune iki ucundan çekme cihazının çenelerine bağlandı. Numuneler gittikçe artan bir yükü kopuncaya kadar çekildi ve numunenin gerilme-uzama değişimi belirlendi. Tavlanmış numuneler çekme testine tabi tutulduklarında veri alınmadan kopmuştur. Tavlanmamış numunenin gerilme-uzama grafiği yardımıyla, gerilme-birim uzama değişimi Şekil 5.7'deki gibi elde edildi.



Şekil 5.7. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Gerilme (σ)-Birim Uzama (ϵ) Grafiği

Elastisite katsayısı, çekme testinden elde edilen en önemli parametrelerden biridir. Numuneye, zamanla artarak uygulanan çekme kuvveti ile birlikte, numune uzamaya

başlar ve bu şekil değiştirme kalıcı olmaz. Şekil 5.7’de de görüleceği üzere, elastik şekil değiştirme denilen bu bölgede elde edilen lineer doğrunun eğiminden, eşitlik (3.4) yardımıyla Elastisite katsayısı 58,120 GPa olarak hesaplandı.

Numune artan kuvvetle çekilmeye devam edildiğinde, uzama da zamanla artmaktadır. Eşitlik (3.6) kullanılarak, çekme testi boyunca numunenin en fazla uzama gösterdiği değerin, numunenin ilk boyuna oranının yüzdesi (maksimum yüzde uzama) %2,4 olarak hesaplandı. Numuneye, kopma noktasına kadar kuvvet uygulanmaya devam edildi ve en fazla gerilme değeri olan çekme dayanımı 1,631 GPa olarak belirlendi. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camında plastik şekil değiştirme bölgesi bulunmamaktadır. Tablo 5.3’te Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camı için çekme testinden elde edilen veriler yer almaktadır. Numunenin çekme dayanımı literatürle uyum içerisindedir.

Tablo 5.3. Bazı Metalik Camların ve Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Metalik Camının Çekme Mukavemeti

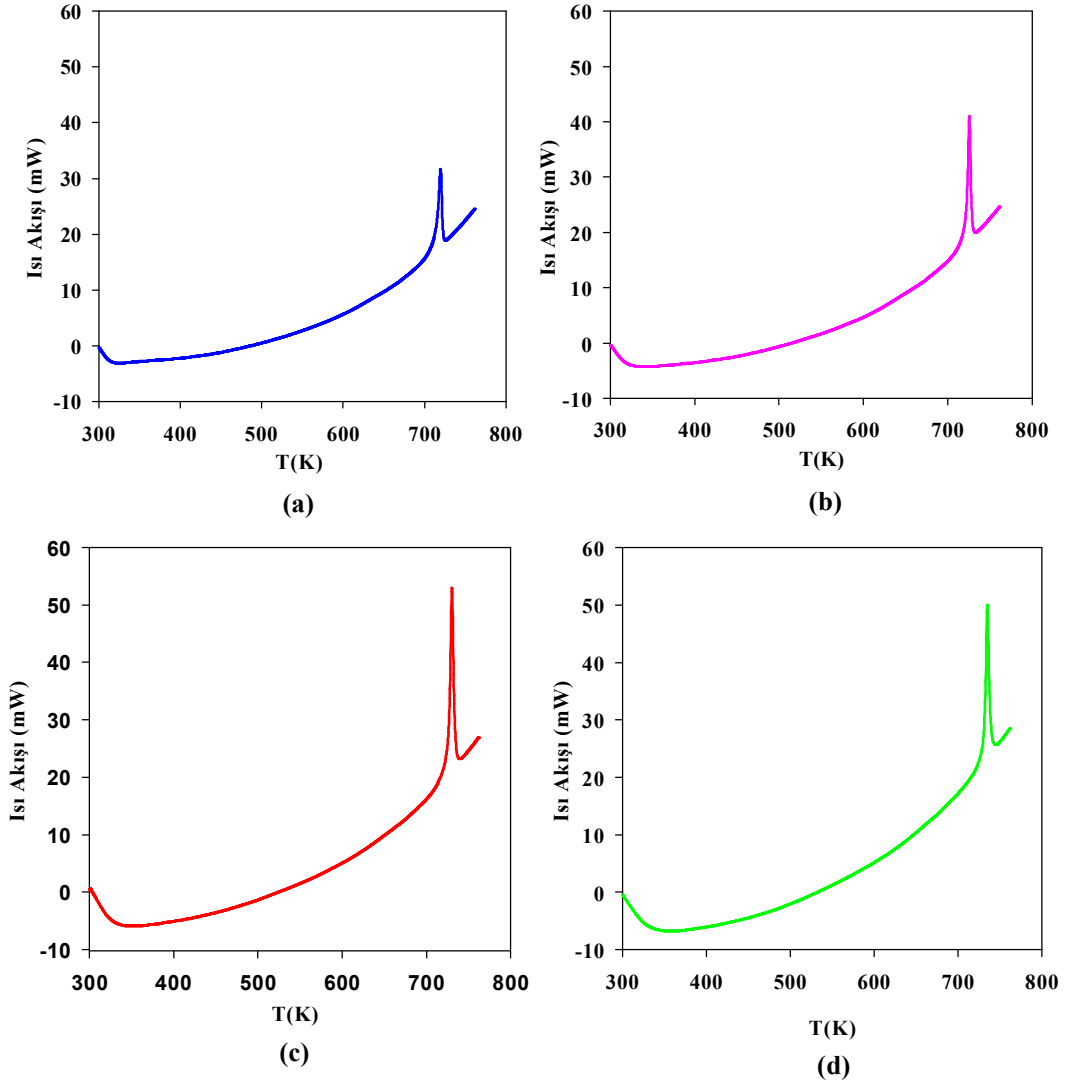
Numune	σ (GPa)
Ni ₄₉ Fe ₂₉ P ₁₄ B ₆ S ₂ [51]	1,7
Fe ₈₀ P ₁₆ C ₂ B ₁ [51]	1,7
Fe ₈₀ B ₂₀ [51]	2,55
Fe ₄₀ Ni ₄₀ B ₂₀ [Bu çalışma]	1,631

5.5. DSC Sonuçları

Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camının öz ısısının incelenmesi amacıyla farklı ısıtma hızlarında DSC analizleri yapıldı. Kesim 3.2.3’te detayları verilen referanslı sürekli modda C_p ölçüm metodu ile numunenin öz ısısını hesaplayıp analizlerini yapabilmek amacıyla ısı akışı (HF)-sıcaklık (T) eğrileri elde edildi. Analizler SETERAM DSC 131 cihazı ile 25 °C-490 °C arasında ölçüldü. Referans olarak safir kullanıldı. Safirin kalibrasyon verileri bu sıcaklık aralığı için standart olarak verildiği için 25 °C-490 °C aralığı tercih edildi. Isıtma hızını sabit tutarak, DSC’nin;

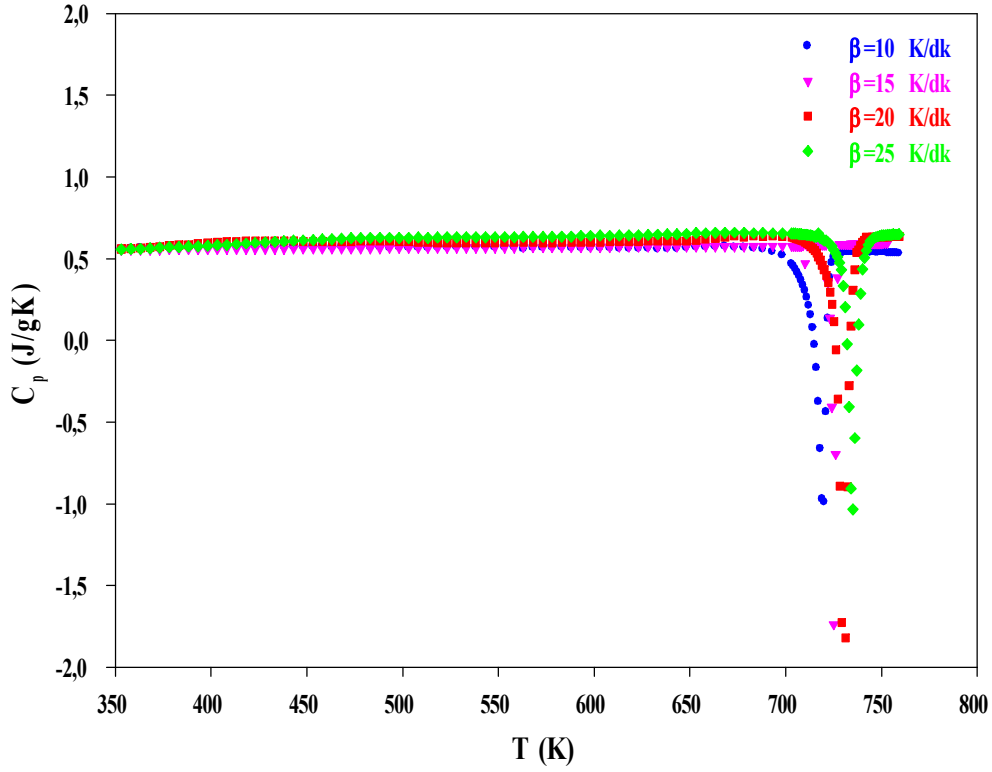
- Her iki kabı boş olan ölçümler,
- Biri boş, diğeri numune olan ölçümler,
- Biri boş, diğeri safir olan ölçümler için HF-T verileri elde edildi.

Ölçümler 10 K/dk, 15 K/dk, 20 K/dk ve 25 K/dk ısıtma hızları için yapıldı. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının farklı ısıtma hızları için elde edilen HF-T verileri Şekil 5.8’de verilmiştir. Artan ısıtma hızı ile ısı akış hızları da arttığından pik değerlerinde artış meydana gelmiştir.



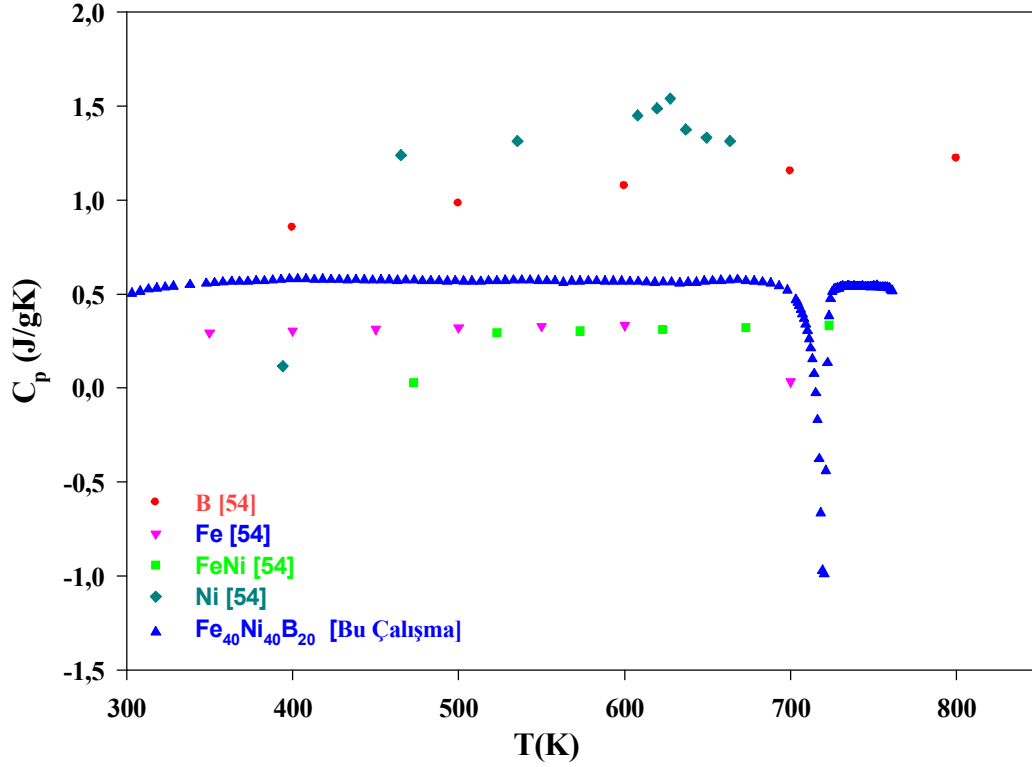
Şekil 5.8. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ için a) 10 K/dk, b) 15 K/dk, c) 20K/dk ve d) 25K/dk Isıtma Hızları Sonucunda Elde Edilen HF-T Verileri

$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ metalik camının öz ısı değerleri, elde edilen HF-T verilerinden de faydalanarak, Kesim 3.2.3.1.2’de detayları verilen Referanslı-Sürekli Modda C_p Ölçüm Metodu kullanılarak belirlendi. Bu metod için öz ısı hesaplama ifadesi olan eşitlik (4.3) yardımıyla $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ metalik camının C_p değerleri hesaplanarak, sıcaklıkla değişimleri incelendi. Şekil 5.9’da $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ için 10 K/dk, 15 K/dk, 20K/dk, 25K/dk ısıtma hızları sonucunda elde edilen C_p -T grafiği görülmektedir. $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ metalik camının ısıtma hızı arttıkça öz ısının ve faz değişim hızının arttığı gözlenmiştir.



Şekil 5.9. $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ için 10 K/dk, 15 K/dk, 20K/dk, 25K/dk Isıtma Hızları Sonucunda Elde Edilen C_p -T Verileri

$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ metalik camının 10 K/dk ısıtma hızı için elde edilen C_p -T verileri, literatürde yer alan B, Fe, Ni ve NiFe verileri ile Şekil 5.10’da karşılaştırılmıştır. Özellikle B ve Ni elementlerinin öz ısılarının yüksek olduğu göz önüne alındığında, $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ metalik camının C_p -T verilerinin literatürle uyum içerisinde olduğu açıktır [53].



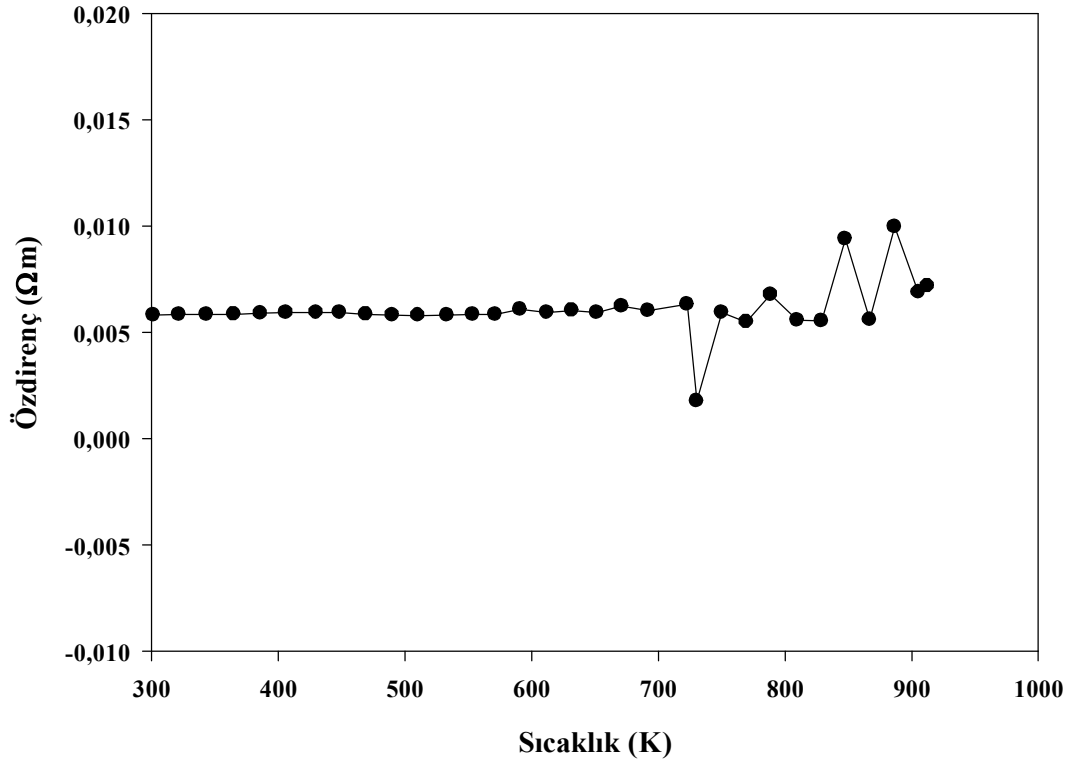
Şekil 5.10. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Metalik Camının 10 K/dk Isıtma Hızı İçin Elde Edilen C_p-T Verilerinin B, Fe ve NiFe C_p-T Verileri İle Karşılaştırılması

5.6. Elektriksel İletkenlik Sonuçları

Detayları Kesim 3.3.1.2’de açıklanan DC Dört nokta elektriksel iletkenlik metodu ile Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik cam numunesi için özdirenç ölçümü yapıldı. Numune üzerinden 4 kontak alındı. Kontaktardan ikisi numune üzerinden geçen akımı ölçmek için, diğer ikisi de iki nokta üzerindeki potansiyel farkını ölçmek için kullanıldı. Numunenin özdirenç ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak incelendi. Şekil 5.11’de Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camının özdirencinin sıcaklıkla değişimi görülmektedir.

Metallerin özdirençleri sıcaklıkla artar. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camında düşük sıcaklıklarda özdirenç sabit kalmaktadır. Bu durum, yarı kararlı olan amorf alaşımların kararlı hale geçmek için gerekli olan enerji engelini aşamamalarından kaynaklanmaktadır. Numunenin kristallenmeye başladığı sıcaklıklarda, özdirencin

değişmeden sabit kaldığı gözlenmektedir. Sıcaklık arttıkça, 720 K'e kadar öz direnç değeri sabit kalmakta, 720 K'den sonra ise öz direnç değerlerinde büyük değişimler gözlenmektedir. Bu sıcaklık değerinden sonra camı yapıdan kristallenmeye geçiş olduğu için öz direnç değerinde değişim gözlenmiştir. Aynı zamanda belirli bir süre sonunda öz direnç değerlerindeki keskin inişler faz geçiş başlangıcını ve yeni faz geçiş evrelerine işaret eder.

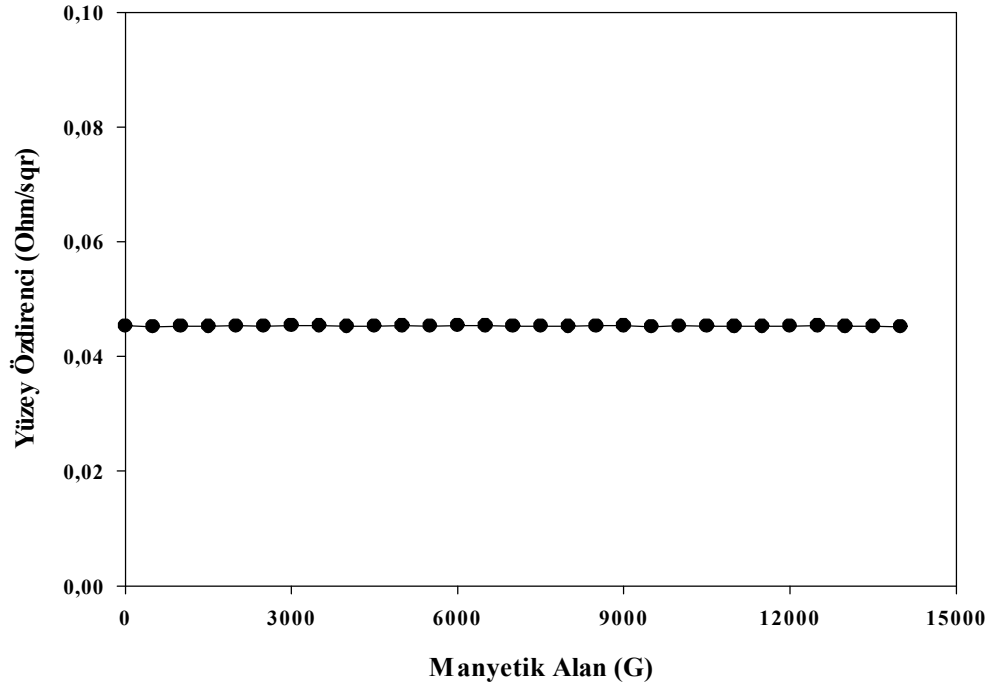


Şekil 5.11. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Metalik Camının Öz direncinin Sıcaklıkla Değişimi

5.7. Hall Ölçüm Sistemi Sonuçları

Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camının manyetik özelliklerinin incelenmesi amacıyla Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Arge Laboratuvarı'ndaki Bilgisayar kontrollü Lake Shore yüksek empedans sistemi kullanıldı. 30 µm kalınlığındaki metalik cam numune üzerinde dört köşeden gümüş pasta ile kontaklar alındı. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ metalik camı için yüzey öz direncinin, hall katsayısının, taşıyıcı yoğunluğunun ve hall mobilitesinin manyetik alanla değişimi incelendi.

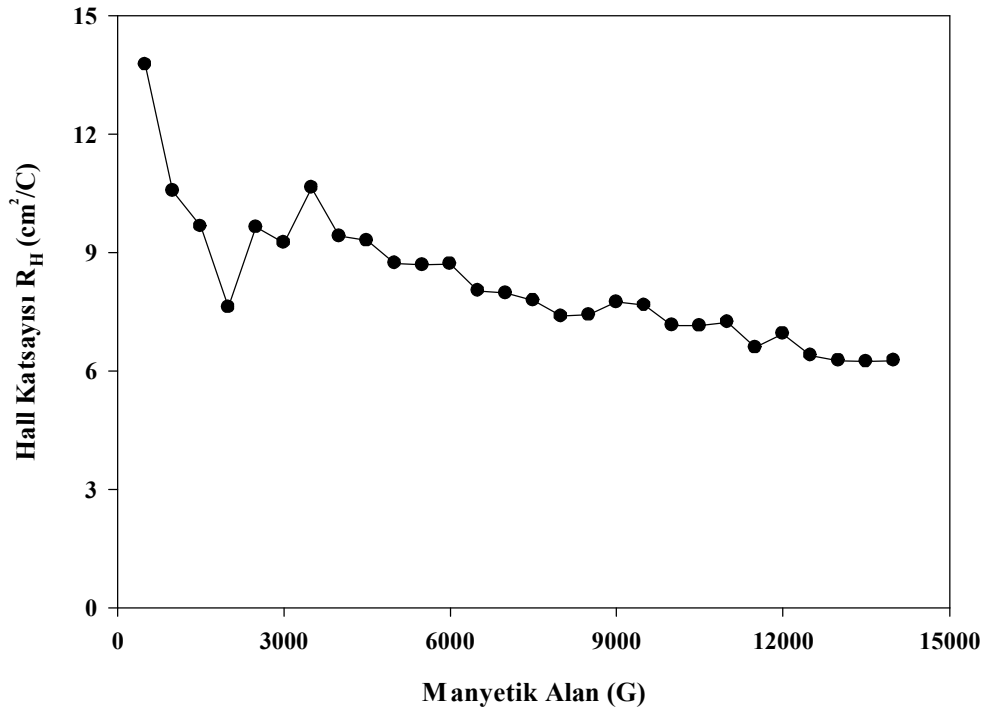
Manyetik direnç, dış bir manyetik alan uygulandığında numunenin elektrik direncinde meydana gelen değişimdir. Şekil 5.12’de $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının yüzey özdirencinin manyetik alanla değişimi görülmektedir. Manyetik alanın artmasıyla yüzey özdirencinin sabit kaldığı gözlenmekte olup özdirencin manyetik alanla değişmemesi beklenen bir durumdur.



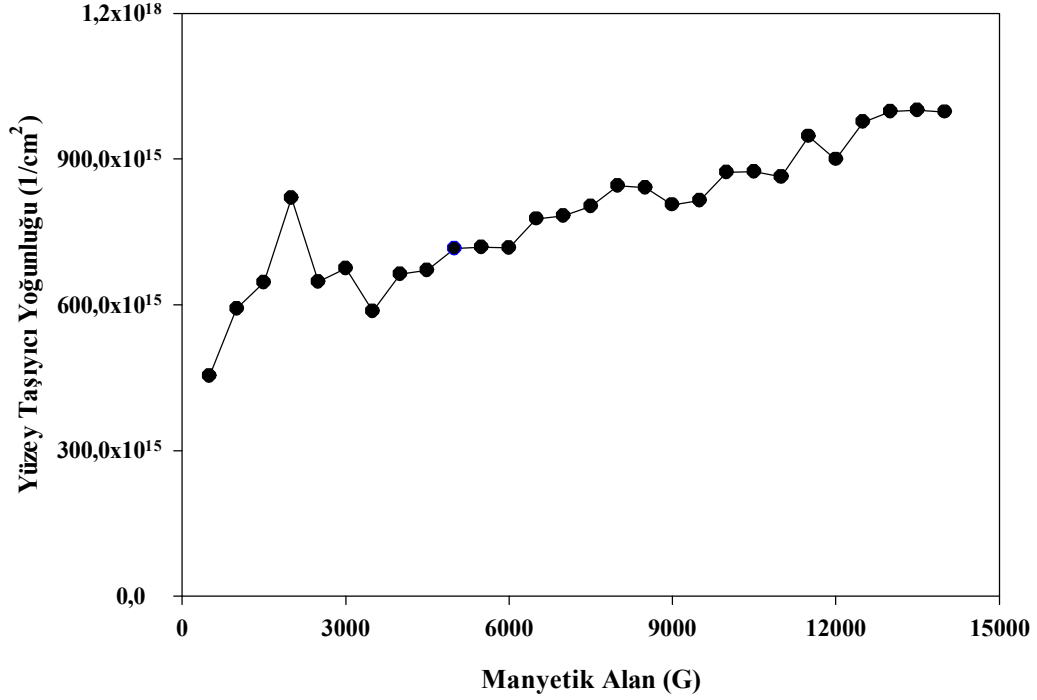
Şekil 5.12. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Yüzey Özdirencinin Manyetik Alanla Değişimi.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camın Hall katsayısının ve yüzey taşıyıcı yoğunluğunun manyetik alanla değişimi verilmiştir. Hall katsayısı $R_H = 1/nq$ ile verilir. Hall katsayısının ölçülmesi, taşıyıcı yoğunluğunun tayininde önemli bir yöntemdir. Dolayısıyla yük taşıyıcı yoğunluğu ne kadar küçükse, Hall katsayısının mutlak değeri o kadar büyük olur. Ölçümler sonucunda, numunenin Hall katsayısının açıkça taşıyıcı yoğunluğu değişimine bağlı olduğu görülmüştür. Manyetik alanla Hall katsayısı azaldığından, taşıyıcı yoğunlukları artar. Elde edilen taşıyıcı yoğunluğu malzemenin iletkenliği hakkında bilgi verir.

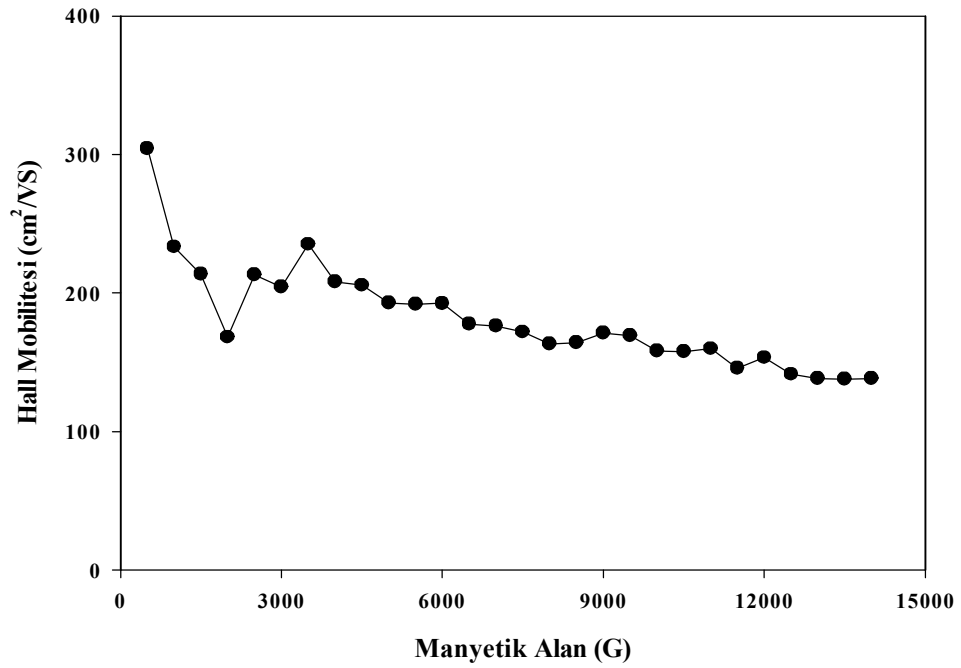
Şekil 5.15'te $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının Hall mobilitesinin manyetik alanla değişimi görülmektedir. Hall mobilitesi $\mu_H = R_H / \rho$ ile verilir. Numunenin öz direnci manyetik alanla değişmediğinden, Hall katsayısının artması ile Hall Mobilitesinin de arttığı gözlenmiştir.



Şekil 5.13. $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Hall Katsayısının Manyetik Alanla Değişimi



Şekil 5.14. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Metalik Camının Yüzey Taşıyıcı Yoğunluğunun Manyetik Alanla Değişimi



Şekil 5.15. Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Metalik Camının Hall Mobilitesinin Manyetik Alanla Değişimi

TARTIŞMA

Teknolojideki hızlı gelişmelerle birlikte, kristal yapılara göre daha üstün özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Daha iyi özelliklere sahip malzeme üretmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri hızlı katılaştırma yöntemidir. Sıvı metalin yeterince büyük hızlarda soğutulması sonucunda elde edilen metalik camlar, üstün mekanik, termal, elektriksel ve manyetik özellikleri sayesinde sanayinin bütün dallarında (savunma, elektronik, tıp, otomotiv, havacılık vb.) ihtiyaç duyulan bir malzeme gurubu haline gelmiştir. Kompozit zırh uygulamaları, mikroelektronik cihazlar için kılıf, elektronik cihazlar için ince ve dolayısıyla hafif kılıf, gece görüş vs. gibi cihazlar için kılıf, füze parçası (dış muhafaza, uç), uçak, gemi parçaları, protez malzemesi ve ameliyat bıçağı gibi birçok kullanım alanlarına sahip olan metalik camlarla ilgili çalışmalar artarak devam etmektedir. Özellikle demir, nikel tabanlı metalik camlar en çok aranan metalik cam türlerindedir.

Bu çalışmada, $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camının mekanik, termal, elektriksel ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Aynı sıcaklıkta farklı tavlama süreleri ile kristal yapı analizi ve Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Farklı ısıtma hızları için numunelerin DSC analizleri yapılmış ve bu verilerden öz ısı değerleri hesaplanmıştır. DC elektriksel özdirenç ölçümleri yapılarak, Hall ölçüm sistemi ile numunenin manyetik özellikleri incelenmiştir.

Gelecek çalışmalarda; B içermeyen alaşımlar veya daha farklı oranlarda B içeren alaşımlar için testler tekrarlanabilir. Tavlanmamış $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ metalik camı için yapılan çekme testi, tavlama işleminin numunenin dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla tavllanmış numunelerle tekrarlanabilir. Ayrıca bu sonuçlar kullanılarak sertlik değerleri ile çekme mukavemetleri arasındaki ilişki incelenebilir. Farklı sıcaklıklarda, aynı tavlama süreleriyle analizler tekrarlanabilir. Aynı alaşımın farklı bileşenleri için elektriksel özdirençleri, farklı ısıtma hızlarında da öz ısıları ölçülebilir. Numunenin yüzeysel özdirenç, Hall taşıyıcı yoğunluğu ve Hall mobilitelerinin belirlendiği bu çalışmada, numunenin hacimsel özdirenç, Hall taşıyıcı yoğunluğu ve Hall mobiliteleri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Duwez, P. ve Villens, R.H., Rapid Quenching of Liquid Alloys, 227, 262-365, 1963.
2. Wang, W.H., Dong, C., Shek, C.H., Bulk metallic glasses, Material Science and Engineering, Vol.44, s. 45-89, 2004.
3. Huang, J.C., Chu, J.P., Jang, J.S.C., Recent progress in metallic glasses in Taiwan, Intermetallics 17, 973–987, 2009.
4. Şahingöz, R., Metalik Cam Üretimi, Elektrik ve Manyetik Özelliklerin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1996.
5. Chaudhari, P. and Turnbull, D., Structure and Properties of Metallic Glasses, Science, Vol. 199, s. 11, 1978.
6. Zallen, S., The physics of amorphous solids, Wiley, 1983.
7. De Crisofaro, N., J. Metals, 38, 17, 1986.
8. Kramer, J., Der amorphe Zustand der Metalle, Zeitschrift für Physik 106, s. 675-691, 1937.
9. Klement, W., Willens, R. H., Duwez, Pol., Non-crystalline Structure in Solidified Gold-Silicon Alloys, Nature 187 (4740): 869–870, 1960.
10. Duwez, P., Metallic Glasses Historical-Background, Topics in Applied Glassy Metal, Springer-Verley, New York, 1, Vol 46, 19-23, 1981.
11. Johnson, W.L., Metallic glasses, ASM Handbook Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials, Vol.2, ASM International, The Materials Information Society, pp. 804-821, 1990.
12. Turnbull, D., The Liquid State and the Liquid-Solid Transition, The Institute of Metals Division Lecture, Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 221, pp. 422-439, 1961.
13. Karaaslan, T., Hızlı Katılaştırılmış Al-(2,5-5-7,5)Mg Alaşımlarının Üretilmesi ve Üretilen Numunelerin Yapı, Fiziksel, Elektriksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 1998.
14. Kerli, S., Al-Y-Ni Amorf Alaşımlarının Elektriksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, 2006.

15. Okumuş, M., Al-Ni-Si Alaşımlarının Hızlı Katılaştırılma İle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, 2006.
16. Aybar, S., Kalın Kesitli, İri ve Hacimli Metalik Camların Katılaştırma ve Kristalleşme Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2007.
17. Oksan, Ö., Co-Fe-Ta-B Esaslı İri Hacimli Metalik Cam Malzemelerin Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 2008.
18. Inoue, A., Shen, B.L., Koshiba, Chang, C.T., Fe and Co Based Bulk Glassy Alloys With Ultrahigh Strenght Of Over 4000 MPa, Intermetallics, Vol.14, pp.936-944, 2006.
19. Lieberman, H., H., and Graham, Jr., IEEE Trans. Magn. MAG-12, 921, 1976.
20. Christian, J.W., Transformations of Metals and Alloys, Pergamon Press, 1957.
21. Narasimhan, N.C., U.S., Patent No. 4142571, 1979.
22. Hubert, J., Mollard, F., and LUX, B., Z. Metallik., 64,835, 1973.
23. Savage, S.J. ve FROES, F.H., Production of Rapidly Solidified Metals and Alloys, Journal of Metals, 20, 1984.
24. Boulby, K. A., and Wood, J. V., P. Powder Met., 29, 33, 1986.
25. Maringer, R. E., and C. E., Mobley, J. Vac. Sci. Technology, 11, 1067, 1974.
26. Güntherodt, H., J., Rapidly Quenched Metals, S. Steeb, H. Warlimmont (Eds.), Elsevier Science Publishers B. V., 1591, 1985.
27. Hayden., H.W., W.G.Moffat, and J. Wulff, The Structure and Properties of Materials, Vol. III, Mechanical Behavior. John Wiley & Sons, New York, 216 pp, 1987.
28. Hibeler, R.C., Statics and Mechanics of Material, Prentice Hall, January, 2004.
29. Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F., Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, s.50, 54, İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, İstanbul, 1990.
30. Howatson, A.M., Lund, P.G. and Todd, J.D., Engineering Tables and Data, s.41.
31. http://www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/mekanik_deneyler/cekmedeneyi.htm

32. Kittel, C., Intruduction to Solid State Physics, John Wiley and Sons, Inc., 122-5, 1963.
33. Kittel, C., Elementary Solid State Physics, John Wiley and Sons, Inc., 49-52, 1962.
34. Sears, F.W., The Kinetics Theory of Gases and Statistical Mechanics, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., An Introduction to Thermodynamics, 1-373, 1964.
35. Tolman, R.C., Principles of Statistical Mechanics, Oxford Univ. Press, London, 1938.
36. Baxter, H., Determination of Specific Heat of Metals, Nature 153, 316, 1944.
37. Born, M. and Karman, T., Vibrations in Space Lattices, Physik Z., 13, 297-309, 1912.
38. Dekker, A.J., Solid States Physics, Prentice-Hall, Inc., 1-525, 1961.
39. Linder, B., Thermodynamics and Introductory Statistical Mechanics, 2004.
40. Whittakker, E.T. and Watson, G.N., Modern Analysis, Cambridge Univ. Press, 4th Edition, 1938.
41. SETARAM Scientific & Industrial Equipments, LABSYS TG-DTA/DSC Users Manual, Appandix p. 125-138 yıl ve SETARAM Scientific & Industrial Equipments, DSC 131 Manual, Commussioning Utilisations, p. 14-15, 2005.
42. Wenner, A method of measuring earth resistivity, Bur. Stand. U.S. Bull. 12, 469-478, 1915.
43. Serin, N., Entegre Devreler, Ankara Üniversitesi Fen-Fak., Birinci Baskı, Ankara, 1990.
44. Baytak, M., Temel Elekt. ve Manyetizma, Atlas Yayınevi, İstanbul, 2002.
45. Raymond, A., Serway, R.J., Phys. For Sci. and Engineers with Modern Phys. 822, 2000.
46. Schukken Jr, R.M., Roy Jr, R.E. and Cox , R.H., J. Polymer Sci. Part C, 6, 18, 1964.
47. Durmuş, S., Gadelenyum Trioksit Katkılanmış Bizmut Trioksit Polimorflarının Sentezlenmesi, Karakterizasyonu ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2008.

48. Wolfe, C. M., Stillman, G. E., Spears, D. L., Hil, D. E. and Williams, F. V., J. Appl. Phys., 44(2), 732, 1973.
49. Look, D. C., Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices, John. Wiley and Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1-57, 1989.
50. Kadziółka-Gaweł, M., Zarek, W., Popiel, E., and Chrobak A., The Crystal Structure and Magnetic Properties of Selected fcc FeNi and Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ Acta Physica Polonica A, 117, 2010.
51. L.A. Davis in Rapidly Quenched Metals, N.J. Grant and B.C. Giessen (eds) Cambridge, MA: MIT Pres, p. 369, Table 1, 1976.
52. www.ptable.com
53. Touloukian, Y.S., Buyco, E.H., Specific Heat of Metallic Elements and Alloys, Thermophysical Properties of Matter, Volume 4, IFI/PLENUM, 1970.

ÖZGEÇMİŞ

19.05.1987 tarihinde Kastamonu’da doğan Satiye KORKMAZ, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Fatih İlköğretim Okulu’nda ve Taşköprü Lisesi’nde tamamlamıştır. 2005 yılında kazandığı Erciyes Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü 2009 yılında başarıyla bitirmiştir.

2009 yılında yüksek lisans eğitimine Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında başlamıştır. Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL danışmanlığında hazırladığı “ $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ Metalik Camının Mekanik, Termal, Elektriksel ve Manyetik Özellikleri” başlıklı teziyle 2011 yılında mezun olmuştur.

İletişim Bilgileri

Adres : Gizlice Mah. Hüseyin Alp Doğan Cad. Şehit Saim Yeşil Sok. Kardelen Apart. No:
11/5 KASTAMONU

E-posta: satiy_e_korkmaz@hotmail.com